

ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧЕРЕЖДЕНИЕ

Лицей «Вторая школа»

*Критченкова А.М.*

# Введение в технологию эксперимента

*Справочное пособие*



Москва 2018



Введение..

Глава 1. С

§ 1. 3

§ 2. 1

§ 3. 1

Глава 2.

§ 1.

§ 2.

§ 3.

§ 4.

§ 5.

§ 6.

§ 7.

§ 8.

§ 9.

§ 10

§ 11

§ 12

Глава 3.

§ 1.

§ 2.

§ 3.

§ 4.

§ 5.

§ 6.

§ 7.

§ 8.

§ 9.

§ 1

Глава 4

§ 1

§ 2

§ 3

§ 4

§ 5

§ 6

§ 7

§ 8

§ 9

§ 10

Глава



# Содержание

Введение .....	3
Глава 1. Оформление .....	5
§ 1. Запись лабораторной работы .....	5
§ 2. Правила округления чисел .....	6
§ 3. Пример оформления эксперимента .....	7
Глава 2. Погрешности измерений .....	8
§ 1. Физическая величина и ее измерение .....	8
§ 2. Классификация измерений .....	9
§ 3. Совпадение или закономерность? .....	10
§ 4. Абсолютная и относительная погрешности .....	11
§ 5. Систематические и случайные погрешности .....	12
§ 6. Классификация систематических погрешностей .....	13
§ 7. Определение приборной погрешности .....	14
§ 8. Расчет случайной погрешности .....	16
§ 9. Расчет погрешности прямых измерений .....	18
§ 10. Среднее независимых величин .....	19
§ 11. Расчет погрешности косвенных измерений .....	19
§ 12. Пример расчета погрешностей .....	20
Глава 3. Построение графиков .....	22
§ 1. Снятие зависимости .....	22
§ 2. Расположение графика .....	23
§ 3. Система координат .....	23
§ 4. Оцифровка .....	24
§ 5. Подпись координатной оси .....	24
§ 6. Нанесение данных .....	25
§ 7. Проведение зависимости .....	25
§ 8. Большие погрешности .....	26
§ 9. Малые погрешности .....	27
§ 10. Нелинейность .....	29
Глава 4. Приборы и оборудование .....	31
§ 1. Штангенциркуль .....	31
§ 2. Микрометр .....	32
§ 3. Весы лабораторные .....	33
§ 4. Электроизмерительные приборы .....	33
§ 5. Амперметр .....	34
§ 6. Вольтметр .....	36
§ 7. Мультиметр .....	37
§ 8. Реостат .....	39
§ 9. Аналоговый осциллограф .....	39
§ 10. Цифровой осциллограф .....	45
Глава 5. Лабораторные работы .....	49



§ 1. Время реакции экспериментатора (7 класс).....	49
§ 2. Сила трения (7 класс).....	50
§ 3. Закон Гука (7 класс).....	51
§ 4. Сила Архимеда (7 класс).....	53
§ 5. Черный ящик с манометром (7 класс).....	54
§ 6. Гидростатическое взвешивание (7 класс).....	55
§ 7. Потери энергии (7 класс).....	57
§ 8. Внутренняя энергия (8 класс).....	58
§ 9. Удельная теплоемкость (8 класс).....	59
§ 10. Кристаллизация и влажность (8 класс).....	61
§ 11. Последовательное и параллельное соединение (8 класс).....	63
§ 12. Вольт-амперная характеристика резистора (8 класс).....	64
§ 13. Вольт-амперная характеристика лампочки (8 класс).....	66
§ 14. Сопротивление приборов (мультиметр, 8 класс).....	68
§ 15. Закон отражения (8 класс).....	69
§ 16. Закон преломления (8 класс).....	71
§ 17. Собирающая линза (8 класс).....	73
§ 18. Рассеивающая линза (8 класс).....	75
§ 19. Дифракционная решетка (8 класс).....	76
§ 10. Правило рычага (9 класс).....	78
§ 21. Равноускоренное движение (9 класс).....	80
§ 22. Под углом к горизонту (9 класс).....	82
§ 23. Вязкое трение (9 класс).....	83
§ 24. Механический серый ящик (9 класс).....	83
§ 25. Оптический серый ящик (9 класс).....	84
§ 26. Электрический черный ящик (9 класс).....	84
§ 27. Математический маятник (9 класс).....	84
§ 28. Пружинный маятник (9 класс).....	87

## Глава 6. Экспериментальная задача ОГЭ ..... 90

§ 1. Критерии проверки.....	90
§ 2. План работы.....	91
§ 3. Виды заданий.....	91
§ 4. Пример задания с решением.....	92
§ 5. Пример задания с комплектом оборудования 1 (плотность).....	93
§ 6. Пример задания с комплектом оборудования 2 (сила Архимеда).....	93
§ 7. Пример задания с комплектом оборудования 3 (закон Гука).....	93
§ 8. Пример задания с комплектом оборудования 4 (сила трения).....	94
§ 9. Пример задания с комплектом оборудования 5 (электричество).....	94
§ 10. Пример задания с комплектом оборудования 6 (оптика).....	95
§ 11. Пример задания с комплектом оборудования 7 (математический маятник).....	95
§ 12. Пример задания с комплектом оборудования 8 (рычаги и блоки).....	96

## Глава 7. Электрический черный ящик ..... 97

§ 1. Классификация.....	97
§ 2. Основные элементы электрической цепи.....	98
§ 3. Исследование черного ящика.....	106



## Введение

Физика — наука экспериментальная. Это означает, что физические законы устанавливаются и проверяются путем накопления и сопоставления экспериментальных данных. Цель экспериментатора заключается в том, чтобы изучить на опыте основные физические явления и правильно проанализировать полученные результаты. Проведение школьных лабораторных работ преследует более узкие цели.

- Иллюстрация законов. Некоторые физические явления при первом знакомстве вызывают недоумение, примером может служить волновая оптика. Эксперимент с дифракционной решеткой позволяет самостоятельно получить картинки, приводимые в учебниках, что способствует лучшему пониманию и запоминанию теории.
- Знакомство с приборами. В учебниках довольно часто приводятся описания экспериментов, проведенных учеными для подтверждения тех или иных законов. И, как правило, эти эксперименты сильно зависят от технических возможностей того времени. Навык работы с простейшими физическими приборами позволяет понять, почему эксперимент был выполнен именно так, а так же представить себе работу более сложных современных устройств.
- Оформление результатов. Для успешной сдачи лабораторной работы необходимо провести анализ эксперимента, а это невозможно без аккуратной и продуманной записи. Необходимо спланировать эксперимент, учесть все допущенные ошибки при проведении измерений и сразу же оценить корректность полученных данных. Все это способствует развитию структурного мышления.
- Работа руками. Большую роль в получении правильных результатов играют навыки экспериментатора. Это в первую очередь хорошо подготовленные инструменты, чистота рабочего места, тщательность проведения измерений. Например, при сборке электрической цепи приборы должны быть удобно расположены, провода не должны хаотически переплетаться и мешать доступу к узлам схемы. Прививается любовь к порядку, методичность в работе, контроль над своим рабочим пространством.

Таким образом, проведение лабораторных работ не только способствуют усвоению материала по теоретической физике, но и развивают многие необходимые для успешного обучения навыки.



По назначению школьные лабораторные работы можно разделить на три категории.

- Качественные: соберите, посмотрите, зарисуйте, сделайте вывод.
- Количественные: соберите, измерьте, вычислите, постройте график, запишите результат.
- Творческие: дан некий набор оборудования, которое можно использовать в эксперименте, дан объект исследования, сформулирована конечная цель, однако не даны чёткие однозначные инструкции.

В данном курсе преобладают количественные задачи, так как именно они являются наиболее полезными при отработке техники физического эксперимента. Но этот курс может дать не только базовые навыки по анализу результатов, он может дать представление о том, каков общий метод физики.

Когда физик сталкивается с каким-либо явлением природы, он старается выделить те особенности, которые ему кажутся самыми важными. Например, древние греки заметили, что движущееся тело в конце концов останавливается. Они заключили, что для поддержания движения необходима сила. А Галилей и Ньютон, наблюдая тоже явление, пришли к другому выводу: замедление движения не главное! Оно вызывается трением, а если трения не будет – движение не прекратится, о чем и говорит первый закон Ньютона.

Таков общий метод физики. Мы выделяем в физическом явлении то, что считаем самым существенным – создаем модель. Затем строим теорию, формулируем выводы и проверяем их с помощью эксперимента. Но полученные выводы относятся к идеализированной модели, чтобы их проверить, нужно создать такую же упрощенную ситуацию в окружающем мире.

В учебниках рассматриваются физические модели реальных явлений. Экспериментальная физика показывает трудность создания правильной модели, ограниченность физических законов, неоднозначность теории. Что я делаю? Зачем я это делаю? Почему я делаю именно так? Где и насколько я мог ошибиться? Что будет, если сделать по-другому? Осмысление всех этих вопросов позволяет нарисовать многогранную картину мира, а привычка задавать их формирует любопытство и жажду познания.



# Глава 1. Оформление

Экспериментальная работа школьника сродни научной работе, выполняемой профессиональными учёными. Прежде всего, необходимо внимательно изучить методическое описание. Дополнительные теоретические сведения об изучаемом явлении можно прочесть в учебнике по физике. Затем необходимо не менее внимательно ознакомиться с приборами, используемыми в задаче, а также с планом проведения измерений. В случае отсутствия плана в описании работы, нужно продумать его самостоятельно.

## § 1. Запись лабораторной работы

Существует общепринятый порядок оформления экспериментальных задач. Работа начинается с титульного листа, на нем располагается таблица для проставления оценок за допуск и защиту, а так же распечатанное методическое описание. На следующей странице указывается название работы, дальнейшее оформление идет по разделам.

### I. Цель работы.

*Обычно формулируется следующим образом: измерить физическую величину, исследовать зависимость, проверить закон.*

### II. Теоретическая часть.

*Краткое рассмотрение физического явления, описание используемой модели (рисунок, условные обозначения, допущения). На основе теоретического рассмотрения предлагаются возможные методы измерений, приводятся итоговые формулы для вычисления величин.*

### III. Приборы и оборудование.

*Схематическое изображение приборов, их характеристики (цена деления, класс точности и т. д.). Рисунок экспериментальной установки с подробным описанием её деталей и узлов.*

### IV. Экспериментальная часть.

*Полученные данные, занесенные в вертикальную таблицу (в случае серии измерений). Особенности эксперимента, приборные погрешности.*

### V. Обработка результатов измерений

*Расчет величин и их погрешностей с достаточной точностью.*

### VI. Итоги

*Рассчитанное значение или график, в зависимости от цели работы. Если возможно, для сравнения приводятся табличные данные.*



## VII. Выводы

Формулируется как ответ на цель работы с указанием точности эксперимента. Проводится анализ теоретических данных и экспериментального результата. Если есть несовпадение, необходимо объяснить, какие факторы могли к нему привести.

### § 2. Правила округления чисел

При записи значений искомых величин и их погрешностей в итогах необходимо провести правильное округление результатов вычислений. При округлении отбрасываются последние цифры числа. Если самая старшая по разряду отбрасываемая цифра (самая левая) больше или равна 5, то к последней оставшейся цифре нужно прибавить 1. Если же старшая цифра меньше 5, то она просто отбрасывается. С одной стороны важно не внести дополнительную погрешность при округлении, а с другой - оставить только достоверные значащие цифры. Для этого нужно руководствоваться следующими правилами.

- После окончания вычислений сначала требуется округлить значение погрешности. Если первая значащая цифра (первая цифра, отличная от нуля) - единица или двойка, то после округления следует оставить две значащие цифры, если тройка или более - то одну. Это правило связано с тем, что вносимая при этом относительная погрешность округления не превышает 15%.
- Далее округляется значение самой величины таким образом, чтобы ее последняя значащая цифра находилась на той же позиции, что и последняя значащая цифра погрешности, то есть количество цифр после запятой у величины и у погрешности должны совпадать.

Рассмотрим примеры.

- До округления:  $x = 2,327$  м;  $\Delta x = 0,158$  м. Сначала округляем погрешность:  $\Delta x = 0,16$  м. Затем округляем величину  $x = 2,33$  м. Результат измерений:  $x = (2,33 \pm 0,16)$  м.
- До округления:  $x = 10,54$  с;  $\Delta x = 0,58$  с. Сначала округляем погрешность:  $\Delta x = 0,6$  с. Затем округляем величину  $x = 10,5$  с. Результат измерений:  $x = (10,5 \pm 0,6)$  с.

В ходе промежуточных вычислений значений и погрешностей сильно округлять не нужно. В расчетах лучше оставлять 4-6 значащих цифр.



### § 3. Пример оформления эксперимента

#### I. Цель работы.

Измерить площадь прямоугольника и сравнить с теоретическим значением.

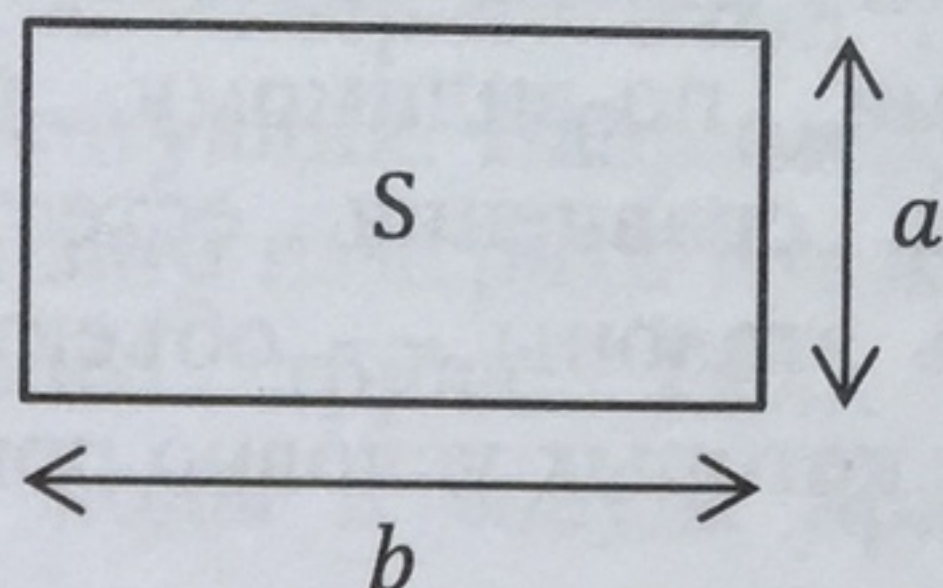
#### II. Теоретическая часть.

$a$  – ширина прямоугольника

$b$  – длина прямоугольника

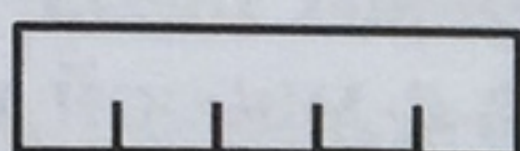
$S$  – площадь прямоугольника

$$S = a \cdot b$$



#### III. Приборы и оборудование.

Линейка



$$c = 1 \text{ мм}$$

#### IV. Экспериментальная часть.

$$a = 10 \text{ мм}$$

$$\Delta a = 0,5 \text{ мм}$$

$$b = 20 \text{ мм}$$

$$\Delta b = 0,5 \text{ мм}$$

#### V. Обработка результатов измерений

$$S = a \cdot b = 10 \text{ мм} \cdot 20 \text{ мм} = 200 \text{ мм}^2$$

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta a}{a} \cdot 100\% = \frac{0,5 \text{ мм}}{10 \text{ мм}} \cdot 100\% = 5\%$$

$$\varepsilon_b = \frac{\Delta b}{b} \cdot 100\% = \frac{0,5 \text{ мм}}{20 \text{ мм}} \cdot 100\% = 2,5\%$$

$$\varepsilon_S = \varepsilon_a + \varepsilon_b = 5\% + 2,5\% = 7,5\%$$

$$\Delta S = \frac{\varepsilon_S \cdot S}{100\%} = \frac{7,5\% \cdot 200 \text{ мм}^2}{100\%} = 15 \text{ мм}^2$$

#### VI. Итоги

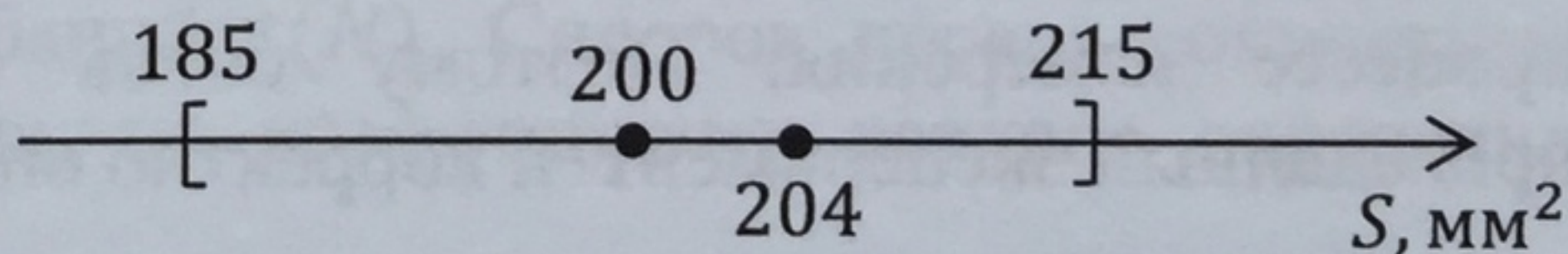
$$S = (200 \pm 15) \text{ мм}^2, \quad \varepsilon_S = 8\%$$

$$S_{\text{теор}} = 204 \text{ мм}^2$$

#### VII. Вывод

Я измерил площадь прямоугольника, результат не точный.

Экспериментальные данные сошлись с теоретическими, так как точка лежит внутри доверительного интервала.





## Глава 2. Погрешности измерений

### § 1. Физическая величина и ее измерение

Ни одна область знаний не обходится без измерений, люди пользуются ими с незапамятных времен. Первыми измеряемыми величинами, по-видимому, были длина, масса, время. Поскольку процедура сравнения естественна для человеческого мышления, появились эталоны — объекты, размер соответствующей физической величины которых условно принят за единицу.

Развитие науки, техники и международная торговля побудили многие страны применять одни и те же единицы измерения. В настоящее время для этой цели разработана Международная система единиц (СИ). Так, измеряя массу какого-либо тела, мы должны сравнить ее с массой гири, которая хранится в Париже и, по международному соглашению, считается эталоном массы 1 кг. Разумеется, чтобы осуществить такое сравнение, не обязательно ехать в Париж, в странах имеются свои эталоны массы. В свою очередь все измерительные приборы, которые поступают в физические лаборатории, сверяются с эталонами. Работая с этими приборами, мы определяем, какую долю международного килограмма составляет масса данного предмета.

Таким образом, процесс измерения фактически сводится к сравнению данной физической величины с соответствующим эталоном, причем это сравнение осуществляется при посредстве измерительных приборов. Реально ни один физический прибор не удастся сделать полностью идентичным эталону. Тут сказывается и несовершенство технологии изготовления, и изнашивание прибора со временем, и многое другое. Ясно, что показания измерительных приборов в большей или меньшей степени отличаются от показаний эталонного прибора. Получается, что измерения никогда не бывают абсолютно точными, результат всегда отличается от истинного значения. Следовательно, указать только результат измерений недостаточно, необходимо также указать вероятную ошибку, допущенную в процессе измерений.

Итак, результат измерения физической величины состоит из полученного значения и его погрешности. Обычно, расхождение теории и эксперимента объясняется именно ошибками, допущенными в процессе измерения. Поэтому очень важно уметь анализировать проведенный эксперимент и корректно оценивать погрешности.



## § 2 Классификация измерений

Некоторые измерения можно делать напрямую - измерение напряжения батарейки вольтметром, измерение длительности урока секундомером. Такие измерения называют прямыми, они достаточно просты. Трудности могут появиться, если измерительный прибор не совсем подходит для измерений в данной ситуации. Например, довольно сложно измерить диаметр шара линейкой, зато измерить тот же диаметр штангенциркулем не составляет особого труда. Если измерять температуру маленькой порции горячей воды в сосуде при помощи здорового термометра, он покажет совсем не ту температуру, что была у воды в пробирке до нашего измерения.

Гораздо чаще приходится иметь дело с измерениями, в которых результат получается при комбинировании напрямую измеренных величин. Например, при нахождении плотности материала кубика, придётся измерить его массу  $m$  и линейные размеры - длину ребра  $a$ , после чего мы сможем посчитать плотность. Такие измерения называют косвенными. Итоговая формула - это формула, в которой косвенно измеряемая величина выражена через прямо измеряемые величины и физические постоянные. В нашем примере (нахождения плотности кубика) итоговой формулой является следующее выражение:  $\rho = \frac{m}{a^3}$ .

Еще бывают совместные измерения - физическая величина находится путем решения системы уравнений, переменные в которых получены в результате измерений. В этом случае обычно проводятся серии измерений при изменяющихся условиях. Как правило, обработка результатов таких измерений проводится через построение графиков. Например, сопротивление резистора можно найти, сняв зависимость текущего через него тока от подаваемого напряжения (ВАХ).

Приведем пример эксперимента. Школьники Иванов, Петров и Сидоров получили задание: с помощью секундомера определить период колебаний маятника. Иванов решил провести прямое измерение: непосредственно измерить время одного полного колебания. Петров решил измерить время  $t$ , за которое маятник совершает  $N$  колебаний и рассчитать период по формуле  $T = t/N$ , Петров провел косвенные измерения. А Сидоров снял зависимость времени нескольких колебаний маятника от количества колебаний  $t(N)$ , Сидоров провел совместные измерения и, построив график, по коэффициенту наклона определил период колебаний маятника.



### § 3. Совпадение или закономерность?

Оказывается, что проверить выдвинутую гипотезу с помощью эксперимента не так-то просто. Разберем следующий пример. Возьмем семиклассника и его рюкзак, взвесим их сначала порознь, а потом вместе. Пусть масса семиклассника равна  $M$ , масса рюкзака равна  $m$ , а масса их обоих —  $\Sigma$ . В механике Ньютона принимается, что  $M + m = \Sigma$  (свойство аддитивности). Попробуем подтвердить эту формулу на опыте.

Пусть взвешивание на весах семиклассника дало 50 кг, а рюкзака — 7 кг. В этом случае  $M + m = 50 \text{ кг} + 7 \text{ кг} = 57 \text{ кг}$ . Проведя взвешивание их обоих, мы получим  $\Sigma = 58 \text{ кг}$ . Таким образом,  $M + m$  почти равно, но все-таки не вполне точно равно  $\Sigma$ . Заранее нельзя сказать, с чем связано наблюдаемое расхождение: с ошибками взвешивания или с неточностью исходной формулы.

Чтобы определить, в чем тут дело, заменим весы и произведем более точные измерения. Допустим, мы получили значение масс  $M = 50,4 \text{ кг}$ ,  $m = 7,1 \text{ кг}$ . Сумма  $M + m = 50,4 \text{ кг} + 7,1 \text{ кг} = 57,5 \text{ кг}$ . А взвешивание семиклассника с рюкзаком дало  $\Sigma = 57,6 \text{ кг}$ . Расхождение в численных значениях  $M + m$  и  $\Sigma$  составляет теперь не целые, а десятые доли килограмма, но не перестает существовать.

Чтобы разобраться в причинах расхождения, произведем несколько измерений массы семиклассника и найдем, что в разных измерениях она оказывается разной: один раз 50,4 кг, другой раз 50,3 кг, а в третий раз даже 50,6 кг. Таким образом, неточность весов вызывает разброс в значениях, составляющий (0,1 — 0,2) кг. Обнаружив это, мы вынуждены сделать еще один вывод: даже если измерение приведет к одинаковым значениям  $M + m$  и  $\Sigma$ , мы не можем быть уверены в том, что это не случайное совпадение. Вернемся теперь к исходной формуле  $M + m = \Sigma$ . Подтвердили ли мы ее с помощью наших опытов или опровергли? Ясно, что мы еще не имеем ответа на этот вопрос.

Физические формулы устанавливают некоторые соотношения, которые должны существовать между измеренными величинами. Проверка этих соотношений не может быть проведена с абсолютной точностью, так как экспериментальные результаты всегда содержат ошибки, играющие огромную роль при сравнении результатов с теоретическими формулами. Целью обработки результатов измерений является получение оценки истинного значения измеряемой величины с минимально возможной погрешностью.



#### § 4. Абсолютная и относительная погрешности

Погрешностью измерения называется отклонение результата измерения физической величины от ее истинного значения. Как правило, истинное значение измеряемой физической величины мы не знаем, а значит, не знаем и погрешность измерения. Однако почти всегда ее можно оценить.

Погрешность принято характеризовать так называемым доверительным интервалом, в котором с высокой долей вероятности содержится истинное значение. Таким образом, в экспериментальной физике вместо одного числа работают с числовыми отрезками. Середина этого отрезка — измеренная физическая величина, ее еще называют средним значением  $x_{\text{ср}}$ .

Как же определить границы доверительного интервала? Расстояние от середины до края и принимается за погрешность измерения  $\Delta x$  (абсолютная погрешность). Таким образом, доверительный интервал — это отрезок  $[x_{\text{ср}} - \Delta x; x_{\text{ср}} + \Delta x]$ . Искусство обработки результатов эксперимента состоит в том, чтобы указать не слишком большой доверительный интервал, но при этом содержащий истинное значение.



Значение измерений вместе с погрешностью принято записывать особым образом:  $x = (x_{\text{ср}} \pm \Delta x) [x]$ , что, по сути, является сокращенной записью  $x \in [x_{\text{ср}} - \Delta x; x_{\text{ср}} + \Delta x]$  — истинное значение лежит внутри доверительного интервала ( $[x]$  обозначает размерность величины  $x$ ).

Если нужно сравнить измеренную физическую величину с ее теоретическим значением, то нужно проверить, попадает ли значение в доверительный интервал. Если попадает, то говорят, что эксперимент согласуется с теорией. Если же не попадает, то эксперимент с теорией не согласуется. При сравнении результатов измерения одной и той же



физической величины различными методами поступают следующим образом. Если доверительные интервалы перекрываются, то говорят, что результаты измерений согласуются. В противном случае результаты измерений не совпадают.

Для того чтобы понять, насколько хороший эксперимент мы провели, значения абсолютной погрешности не достаточно. Например, взвесим на одних и тех же весах два груза — легкий и тяжелый. Допустим, погрешность взвешивания нам известна и равна 1 г. Пусть для легкого груза мы получили значение  $m_1 = (3 \pm 1)$  г, а для тяжелого —  $m_2 = (100 \pm 1)$  г. Интуитивно понятно, что второе измерение гораздо точнее!

Для оценки точности эксперимента вводится дополнительная величина, равная отношению погрешности к среднему значению. Ее называют относительной погрешностью и, как правило, выражают в процентах  $\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{ср}}} \cdot 100\%$ . В школьных лабораторных работах хорошим экспериментом считается тот, который дает относительную погрешность измерений не более 5%.

## § 5. Систематические и случайные погрешности

Ошибки, возникающие при измерениях, делятся на два больших класса: погрешности случайные и погрешности систематические. Для выяснения разницы между ними вернемся к нашему примеру с взвешиванием.

При взвешивании разновес кладется обычно на правую чашку весов, а взвешиваемое тело — на левую. Правое и левое плечи весов не могут быть сделаны, конечно, в точности одинаковыми. Разница в длине плеч искажает результаты измерений и притом всегда одинаковым образом. Систематическая погрешность — это составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или изменяющаяся закономерно на протяжении серии измерений при одних и тех же контролируемых условиях. К систематическим ошибкам принадлежат ошибки, связанные с неправильным весом гирь, с неточной разбивкой шкалы измерительных линеек и т. д.

Неравноплечность весов и ошибки в калибровке гирь представляют собой не единственные причины погрешности взвешивания. Коромысло весов качается с некоторым трением. Поэтому даже при неизменной нагрузке весов оно останавливается не всегда в одном и том же месте, а в



разных. Ошибки в этом случае от опыта к опыту не повторяются, а всегда имеют разное значение. Случайная погрешность - это составляющая погрешности измерения, непредсказуемым образом изменяющая свою величину (и знак!) в данной серии измерений, проведенных при одних и тех же условиях.

Легко видеть, что влияние случайных ошибок на результат измерений может быть уменьшено при многократном повторении опыта. Трение коромысла весов приводит к тому, что в одних опытах для веса тела получаются завышенные значения, а в других — заниженные. Произведя измерения несколько раз и вычислив среднее значение веса тела, можно существенно улучшить точность измерений, так как преувеличенные и преуменьшенные значения почти скомпенсируют друг друга.

Уменьшить вклад систематических ошибок путем повторения опыта, конечно, нельзя. Для этого нужно усовершенствовать прибор (например, уменьшить неравноплечность весов) или изменить методику измерений (взвешивать, например, тело дважды, один раз на левой, а другой раз на правой чашке весов, и усреднить полученные результаты, применить весы лучшего качества, производить взвешивание с более точным разновесом и т. д.).

## § 6. Классификация систематических погрешностей

Систематические погрешности делятся на три группы: приборная погрешность, инструментальная и методическая. При аккуратном выполнении эксперимента вклад последних можно свести к пренебрежимо малым величинам, поэтому при обработке результатов обычно учитывают только приборную погрешность.

Приборная погрешность — ошибка, возникающая при считывании экспериментатором показаний прибора. Эта погрешность характеризует аккуратность эксперимента и, вопреки распространенному мнению, не всегда равна половине цены деления шкалы. Для уменьшения приборной погрешности необходимо взять другой прибор или изменить процесс измерений.

Инструментальная погрешность обуславливается принципиальным несовершенством технических средств, используемых при измерении. Самый распространенный пример — неточная установка прибора на ноль перед измерением. Способ устранения инструментальной погрешности прост: перед выполнением эксперимента убедитесь, что все приборы работают исправно.



Погрешность, вызванная несовершенством применяемого при измерении метода, называется методической. Она возникает, потому что метод, положенный в основу любого процесса измерения, лишь с какой-то степенью точности отображает истинное положение вещей. Например, в используемой математической модели эксперимента не учитывается наличие сил трения или сопротивления воздуха. Этот вид погрешности очень сложно оценить. Если наблюдается несовпадение теории и эксперимента, обычно говорят лишь о причинах возникновения методической погрешности, без оценки погрешности как таковой. Понимание причин возникновения методических погрешностей свидетельствует о высоком уровне понимания физики.

## § 7. Определение приборной погрешности

Все физические приборы характеризуются точностью. Если измеряемая величина считывается со шкалы прибора, то расстояние между двумя соседними метками (штрихами) на шкале прибора и определяет максимальную точность. Значение измеряемой величины попадает между двумя делениями шкалы, экспериментатор на глаз определяет, к какому делению ближе, и записывает показания. А значит, максимальная ошибка при выборе одного из штрихов равна половине цены деления шкалы. Например, погрешность измерений миллиметровой линейкой равна 0,5 мм. Можно пытаться уверять себя, что «на глаз» видно и  $1/5$  расстояния между делениями шкалы, но в случае линейки это самообман.

Однако, приборная погрешность далеко не всегда равна половине цены деления. Если измерения проводятся с помощью прибора с широкой шкалой (метки расположены далеко друг от друга), можно на глаз ввести еще один штрих – середину деления. Тогда экспериментатор определяет: показания ближе к делениям или к середине между ними. В этом случае погрешность будет составлять четверть цены деления. Возможен и обратный случай. Допустим, нужно измерить линейкой расстояние между двумя метками, а сами метки имеют толщину в несколько миллиметров. Тогда и погрешность измерения нужно положить равной миллиметру, а то и двум!

Погрешность цифровых приборов обычно равна половине цены деления из тех же самых соображений. Допустим, цифровой вольтметр показывает значение напряжения 8,7 В. Это значит, что истинное значение лежит в интервале (8,65 ; 8,74) В, а прибор округляет значение до одной цифры после запятой.



Стрелочные приборы имеют особую погрешность, называемую «класс точности» прибора. Она пишется на самом приборе и измеряется в процентах от шкалы (число в галочке) или в процентах от значения (число в кружочке, встречается гораздо реже). Если амперметр имеет шкалу от 0 до 2 А и класс точности  $\frac{2,0}{V}$ , то это означает, что погрешность измерения тока составляет 2,0 % от 2 А, то есть 0,04 А. При проведении измерений стрелочными приборами первого типа следует учитывать, что у них есть так называемый «рабочий диапазон» - хорошая точность измерений достигается только при отклонениях стрелки больше чем на половину шкалы. А так же следует помнить об ошибке округления при снятии показаний со шкалы.

Рассмотрим пример: амперметр имеет шкалу от 0 до 2 А с ценой деления 0,1 А и класс точности  $\frac{2,0}{V}$ . Это означает, что погрешность измерения тока составляет 2,0 % от 2 А, то есть 0,04 А. Погрешность, возникающая из-за округления до ближайшего деления, будет равна половине цены деления — 0,05 А. Получается, что погрешность округления по шкале больше, а значит, именно она будет определять отклонение в результатах. То есть, приборная погрешность амперметра будет равна 0,05 А.

Рассмотрим другой пример: вольтметр имеет шкалу от 0 до 6 В с ценой деления 0,2 В и класс точности  $\frac{2,5}{V}$ . Это означает, что погрешность измерения напряжения составляет 2,5 % от 6 В, то есть 0,15 В. Погрешность, возникающая из-за округления до ближайшего деления, будет равна половине цены деления — 0,1 В. Получается, что погрешность округления по шкале меньше, а значит, отклонение в результатах будет определяться классом точности прибора. То есть, приборная погрешность будет равна 0,15 В. Проведем несколько измерений этим вольтметром:

При напряжении в 6 В относительная погрешность  $\frac{0,15 \text{ В}}{6 \text{ В}} \cdot 100\% = 2,5\%$ .

При напряжении в 3 В относительная погрешность  $\frac{0,15 \text{ В}}{3 \text{ В}} \cdot 100\% = 5\%$ .

При напряжении в 1 В относительная погрешность  $\frac{0,15 \text{ В}}{1 \text{ В}} \cdot 100\% = 15\%$ .

Видно, что при измерении маленьких напряжений точность сильно падает. Именно поэтому для измерений с хорошей точностью рекомендуется выбирать такой прибор, на котором отклонение стрелки будет больше чем на половину шкалы.



## § 8. Расчет случайной погрешности

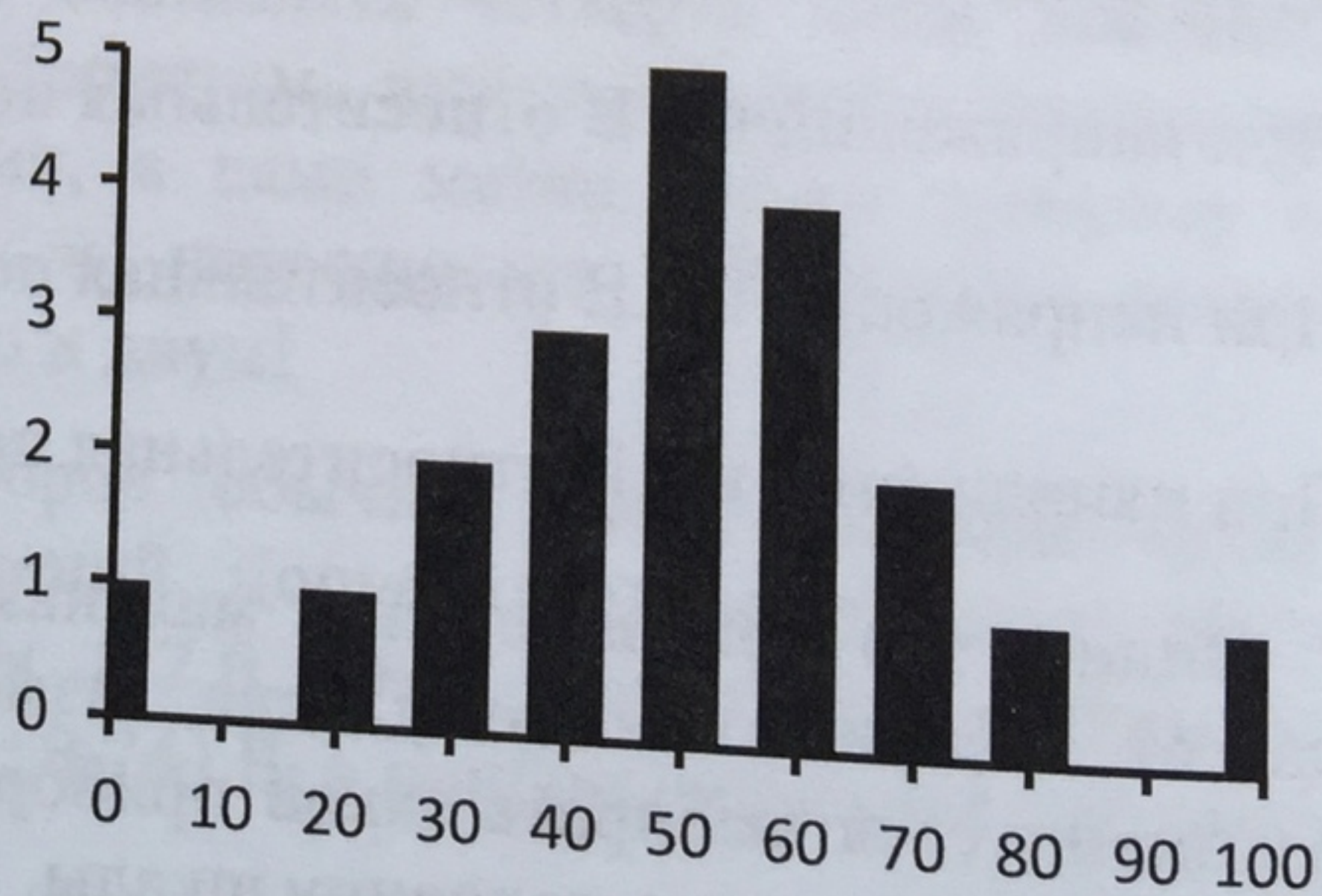
Если на эксперимент произвольным образом влияют какие-либо факторы, то при повторных измерениях одной и той же величины будут получены разные результаты. Например, нужно установить дальность полётов пуль, выпущенных с определённой высоты в горизонтальном направлении из данного орудия. Понятно, что от выстрела к выстрелу немного меняются условия эксперимента, существует множество факторов, влияющих на результат, причём они могут изменить его как в большую, так и в меньшую сторону. Изменения дальности полёта от выстрела к выстрелу носят случайный характер, имеется непредсказуемый разброс измеряемых значений от опыта к опыту. В этом случае, чтобы охарактеризовать измеряемую величину, нужно найти некое среднее её значение. Его вычисляют по формуле среднего арифметического:  $x_{\text{ср}} = \frac{\sum x_i}{N}$ . Здесь  $x_{\text{ср}}$  — среднее значение,  $x_i$  — значение в эксперименте с номером  $i$ ,  $N$  — количество измерений.

Как правило, внимательно посмотрев на записанные измерения, можно найти несколько промахов — следствие неправильных действий экспериментатора. Это, например, описка при записи результатов наблюдений, неправильно снятое показание прибора и т. д. Такие измерения всегда следует исключать из рассмотрения.

Результаты серии измерений можно наглядно представить, построив диаграмму, которая показывала бы, как часто получались те или иные значения. Разобьем весь диапазон измеренных значений на равные интервалы и подсчитаем, сколько раз измеренная величина попадает в каждый интервал. Для примера, в таблице приведены реальные данные эксперимента ( $N$  — номер эксперимента,  $x$  — измеряемая величина), и изображена соответствующая диаграмма.

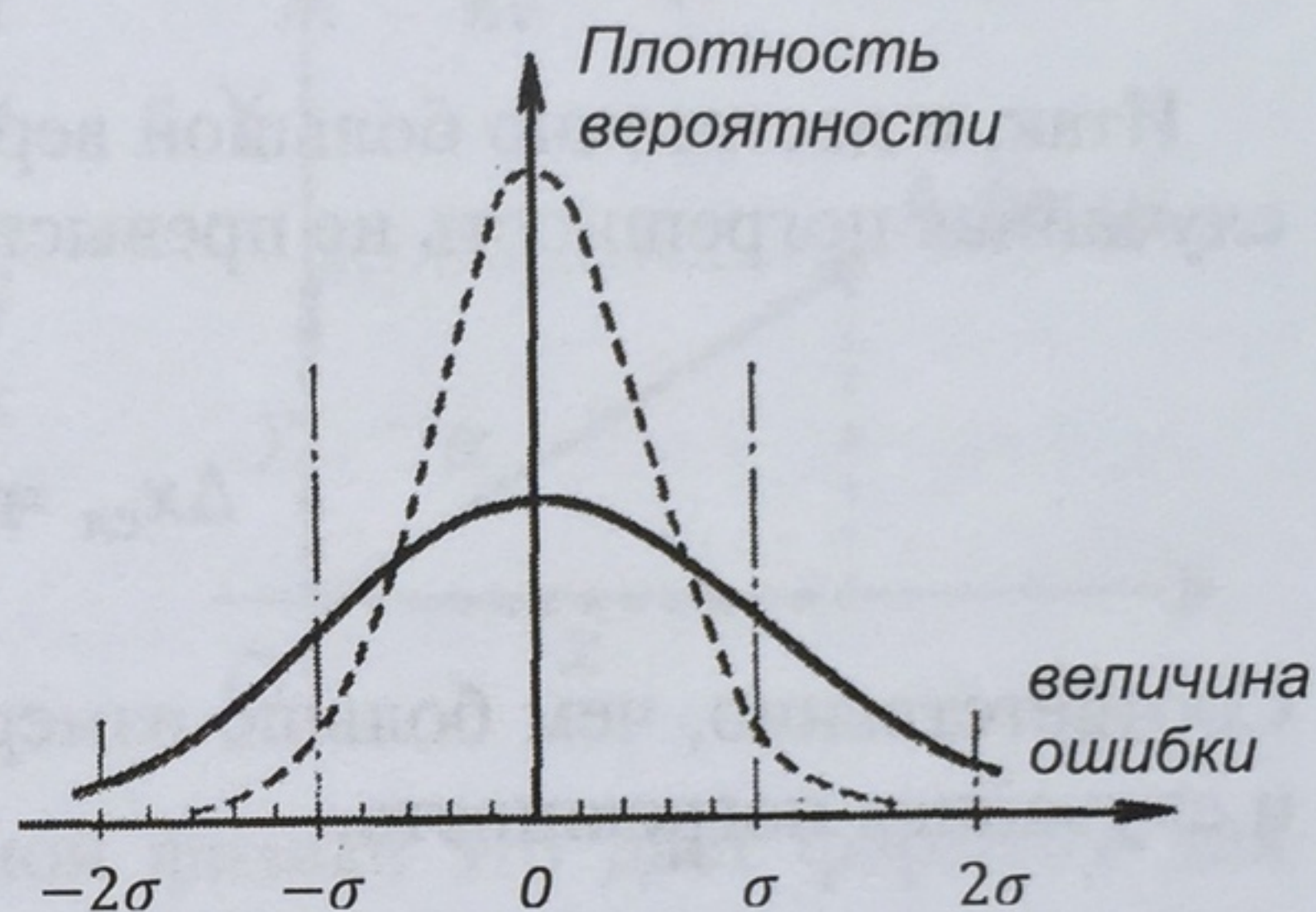
$N$	$x$ , мм
1	41
2	70
3	60
4	97
5	73
6	33
7	50
8	57
9	55
10	32

$N$	$x$ , мм
11	83
12	64
13	55
14	69
15	43
16	24
17	66
18	7
19	45
20	52





Так как нам нужно оценить погрешность, рассчитаем для каждого измерения отклонение от среднего:  $x_{\text{ср}} - x_i$ . Построим новый график, где по оси абсцисс будет отклонение от среднего, а по оси ординат — доля полного числа измерений, попадающая в каждый интервал. Теперь представим себе, что измерения продолжают до тех пор, пока число измеренных значений не станет очень большим. Ширину интервалов можно сделать очень малой (при условии, что измерительный прибор обладает достаточной чувствительностью). Если теперь вместо диаграммы построить график, который давал бы долю полного числа отсчетов, попадающую в интервал (плотность вероятности), получится гладкая кривая. Она носит название кривой Гаусса. Теория вероятностей позволяет вычислить форму этой кривой, она имеет вид колокола с максимумом при отклонении от среднего, равном нулю. При хороших измерениях кривая Гаусса заметно отличается от нуля лишь в области малых ошибок (пунктирная кривая). При плохих измерениях (сплошная кривая) — колокол расширяется.



Как и для диаграмм, доля случаев, в которых ошибка лежит в некотором интервале  $-\sigma < \Delta x < +\sigma$  определяется площадью под соответствующим участком кривой. Проведем на одинаковых расстояниях от оси ординат две вертикальные прямые так, чтобы между ними уместилось 68% площади, заключенной под всей сплошной кривой. Эти прямые отсекают на оси ошибок отрезки  $\pm\sigma$ . Найденная таким образом величина  $\sigma$  носит название стандартного отклонения или стандартной ошибки. Как это ясно из построения, в 68 случаях из 100 фактическая ошибка опыта окажется меньше, а в 32 случаях — больше, чем стандартная ошибка. В качестве ожидаемой ошибки опыта принято указывать именно величину стандартного отклонения. Заметим для справок, что ошибки опыта в 95% случаев лежат в интервале  $\pm 2\sigma$  и в 99,7% случаев не превосходят  $\pm 3\sigma$ .

В теории вероятностей показывается, как вычислять величину  $\sigma$  по разбросу экспериментальных данных:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_{\text{ср}} - x_i)^2}{N - 1}}$$



Приведенная формула показывает, как найти ширину распределения ошибок отдельных измерений. Вычисленное с ее помощью стандартное отклонение определяет ожидаемую ошибку каждого отдельного измерения. Используя всю совокупность измерений, мы, конечно, находим искомое значение измеряемой величины с лучшей точностью, чем это можно сделать с помощью одного измерения. Как уже отмечалось, причина улучшения результата лежит в том, что положительные и отрицательные ошибки частично компенсируются при усреднении результатов нескольких опытов. В теории вероятностей показывается, что при таком усреднении стандартная ошибка результата уменьшается:  $\sigma_{\text{ср}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ .

Итак, с достаточно большой вероятностью мы можем утверждать, что случайная погрешность не превысит следующей величины:

$$\Delta x_{\text{сл}} = \sqrt{\frac{\sum (x_{\text{ср}} - x_i)^2}{N \cdot (N-1)}}.$$

Соответственно, чем больше измерений проведено, тем меньше разброс и случайная погрешность.

## § 9. Расчет погрешности прямых измерений

Погрешность прямых измерений складывается из систематических (приборная, инструментальная, методическая) и случайной погрешности. Так как природа этих ошибок различна, их можно считать независимыми друг от друга. Тогда погрешность измеряемой величины определяется следующим образом:

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_{\text{пр}})^2 + (\Delta x_{\text{сл}})^2 + (\Delta x_{\text{инс}})^2 + (\Delta x_{\text{мет}})^2}$$

Однако, чаще всего вклад инструментальной погрешности можно свести к нулю, методическая погрешность и вовсе не оценивается. Тогда при обработке результатов учитывается только приборная и случайная погрешности.

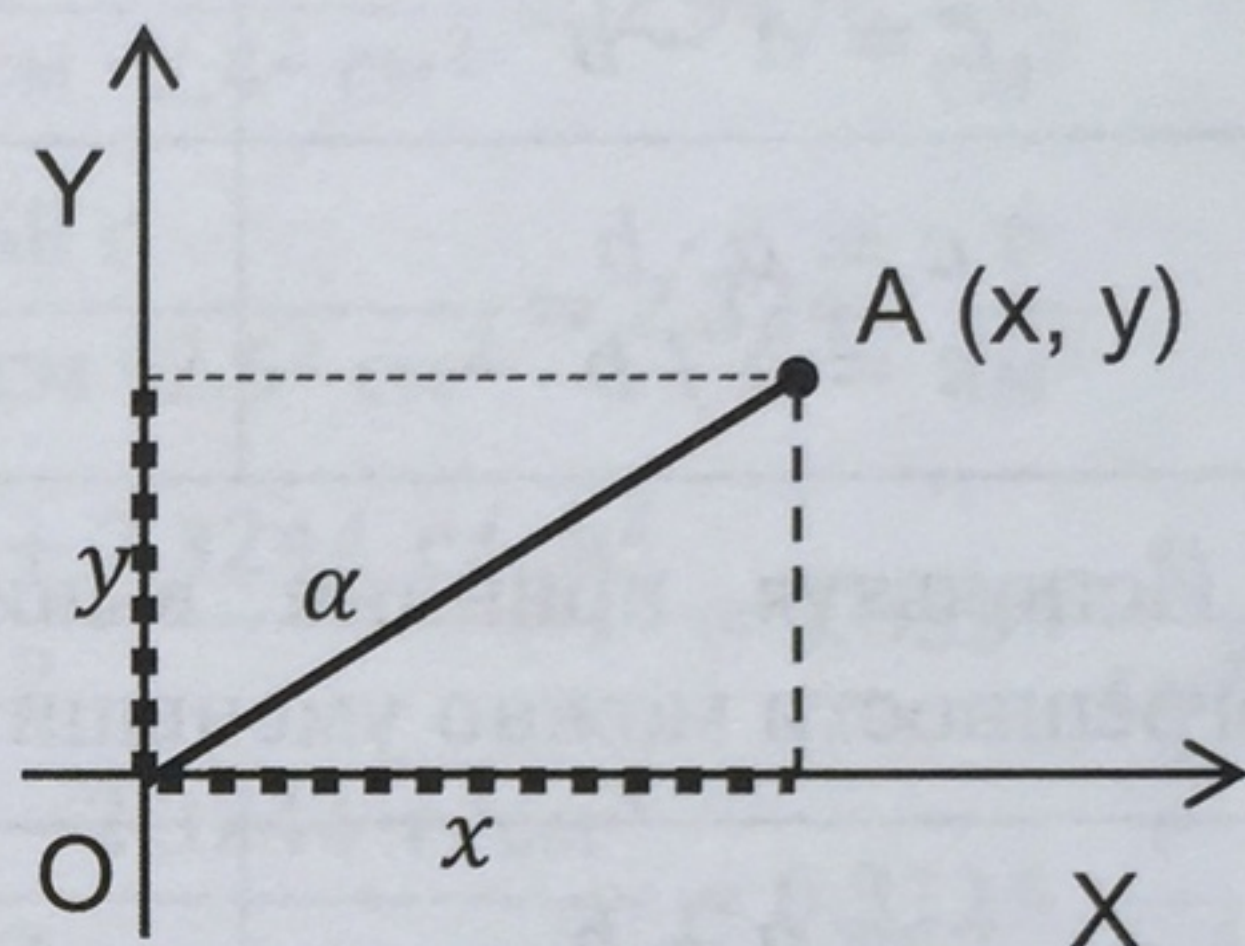
Как было выше сказано, увеличивая количество измерений можно уменьшить случайную погрешность практически до нуля. Однако это не целесообразно, так как итоговая ошибка зависит еще и от приборной погрешности. Разумно провести такое количество экспериментов, чтобы величины случайной и приборной погрешности были примерно равны.



## § 10. Среднее независимых величин

Рассмотрим координатную плоскость  $XOY$ . Отметим на ней точку  $A(x, y)$ . Координаты этой точки представляют собой два независимых числа, характеризующие расстояние от начала координат до точки вдоль осей. Представим себе, что нам нужно посчитать среднее этих чисел  $\alpha$ . По сути, нам нужно посчитать некое среднее расстояние от начала координат до точки  $A$ , используя обе оси — используя плоскость. Логично предположить, что это среднее расстояние — длина отрезка  $OA$ , вычисляемая по теореме Пифагора:  $\alpha = \sqrt{x^2 + y^2}$ .

Аналогичным образом выглядит формула для трех величин (трехмерная система координат) и т. д. Можно предположить, что для  $N$  независимых величин, имеющих значение  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), формула имеет вид  $\alpha = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i)^2}$ .



Применительно к экспериментальной физике это дает формулу для расчета итоговой погрешности прямого измерения:

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_{\text{пр}})^2 + (\Delta x_{\text{сл}})^2 + (\Delta x_{\text{инс}})^2 + (\Delta x_{\text{мет}})^2}$$

## § 11. Расчет погрешности косвенных измерений

Проведем эксперимент, взвесим две пластины  $A$  и  $B$ . Масса пластины  $A$  получилась  $11,8$  г, пластины  $B$  —  $8,7$  г. Пусть на весах написано: «погрешность  $0,1$  г». Тогда измеренные величины необходимо записать следующим образом:  $M_A = (11,8 \pm 0,1)$  г,  $M_B = (8,7 \pm 0,1)$  г. Как же найти сумму измеренных величин  $M_A$  и  $M_B$ , какова будет погрешность этой суммы?

Естественно предположить, что минимально возможное значение  $M_A + M_B$  определяется как сумма наименьших значений  $M_A$  и  $M_B$ :  $11,7 + 8,6 = 20,3$ . А максимально возможное значение  $M_A + M_B$  определяется как сумма наибольших значений:  $11,9 + 8,8 = 20,7$ . Тогда доверительный интервал для  $M_A + M_B$  —  $(20,3; 20,7)$ , то есть  $M_A + M_B = (20,5 \pm 0,2)$  г.



Руководствуясь такими соображениями, можно рассчитать погрешность косвенных измерений. Этот способ носит название метод интервалов, так как в своей основе он использует расчет через доверительный интервал. Порядок вычислений: сначала, исходя из формулы, определяется доверительный интервал расчетной величины, а потом вычисляется среднее значение и абсолютная погрешность.

Используя метод интервалов и некоторые допущения можно вывести готовые расчетные формулы погрешностей.

$c = a + b$ $c = a - b$	$\Delta c = \Delta a + \Delta b$	$\varepsilon_c = \frac{\Delta c}{c} \cdot 100\%$
$c = a \cdot b$ $c = a / b$	$\varepsilon_c = \varepsilon_a + \varepsilon_b$	$\Delta c = \frac{\varepsilon_c \cdot c}{100\%}$

Используя принцип вычисления среднего независимых величин, погрешности можно уменьшить.

$c = a + b$ $c = a - b$	$\Delta c = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2}$	$\varepsilon_c = \frac{\Delta c}{c} \cdot 100\%$
$c = a \cdot b$ $c = a / b$	$\varepsilon_c = \sqrt{\varepsilon_a^2 + \varepsilon_b^2}$	$\Delta c = \frac{\varepsilon_c \cdot c}{100\%}$

Порядок вычислений по методу средних: сначала, исходя из формулы, определяется среднее значение величины, потом вычисляется ее абсолютная или относительная погрешность.

Погрешность косвенных измерений величины  $f(x_1, \dots, x_N)$  в общем виде:

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_N} \cdot \Delta x_N\right)^2}$$

## § 12. Пример расчета погрешностей

Школьники Иванов и Петров получили задание: с помощью линейки и весов определить плотность цилиндра. Ребята вывели итоговую формулу расчета плотности:  $\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{h \cdot \frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4m}{\pi h d^2}$ . Здесь  $m$  – масса цилиндра,  $h$  – высота,  $d$  – диаметр.



Проведя измерения, они получили следующие значения:

$$m = (59 \pm 1) \text{ г}, \quad \varepsilon_m = 1,7\%;$$

$$h = (4,6 \pm 0,1) \text{ см}, \quad \varepsilon_h = 2,2\%;$$

$$d = (2,5 \pm 0,1) \text{ см}, \quad \varepsilon_d = 4\%.$$

Иванов решил рассчитывать погрешность по методу интервалов, а Петров – по методу средних.

Расчеты Иванова:  $\rho = (2,6 \pm 0,3) \text{ г/см}^3, \quad \varepsilon_\rho = 12\%$

$$\rho_{\max} = \frac{4m_{\max}}{\pi h_{\min} d_{\min}^2} = \frac{4 \cdot 60 \text{ г}}{3,1415 \cdot 4,5 \text{ см} \cdot 2,4^2 \text{ см}^2} = 2,9474 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$$

$$\rho_{\min} = \frac{4m_{\min}}{\pi h_{\max} d_{\max}^2} = \frac{4 \cdot 58 \text{ г}}{3,1415 \cdot 4,7 \text{ см} \cdot 2,6^2 \text{ см}^2} = 2,3244 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$$

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{\rho_{\max} + \rho_{\min}}{2} = \frac{2,9474 \text{ г/см}^3 + 2,3244 \text{ г/см}^3}{2} = 2,6359 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$$

$$\Delta\rho = \frac{\rho_{\max} - \rho_{\min}}{2} = \frac{2,9474 \text{ г/см}^3 - 2,3244 \text{ г/см}^3}{2} = 0,3115 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$$

$$\varepsilon_\rho = \frac{\Delta\rho}{\rho_{\text{ср}}} \cdot 100\% = \frac{0,3115 \text{ г/см}^3}{2,6359 \text{ г/см}^3} \cdot 100\% = 11,82\%$$

Расчеты Петрова:  $\rho = (2,61 \pm 0,27) \text{ г/см}^3, \quad \varepsilon = 10\%$

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{4m_{\text{ср}}}{\pi h_{\text{ср}} d_{\text{ср}}^2} = \frac{4 \cdot 59 \text{ г}}{3,1415 \cdot 4,6 \text{ см} \cdot 2,5^2 \text{ см}^2} = 2,613 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$$

$$\varepsilon_\rho = \sqrt{\varepsilon_m^2 + (\varepsilon_h + \varepsilon_d + \varepsilon_d)^2} = \sqrt{1,7^2 + (2,2 + 4 + 4)^2} = 10,34 \%$$

$$\Delta\rho = \frac{\rho_{\text{ср}} \cdot \varepsilon_\rho}{100\%} = \frac{2,613 \text{ г/см}^3 \cdot 10,34\%}{100\%} = 0,27 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$$

Петров получил результат на несколько процентов точнее, чем Иванов. Кроме того, при простой итоговой формуле расчет быстрее вести используя метод средних.

Пример вывода формулы расчета погрешности величины  $y = \frac{(4x-2)^2}{3z+5}$ .

$$\varepsilon_y = \varepsilon((4x-2)^2) + \varepsilon(3z+5) = \varepsilon(4x-2) + \varepsilon(4x-2) + \varepsilon(3z+5) =$$

$$= 2 \cdot \frac{\Delta(4x-2)}{4x-2} + \frac{\Delta(3z+5)}{3z+5} = 2 \cdot \frac{\Delta(4x)}{4x-2} + \frac{\Delta(3z)}{3z+5} = 2 \cdot \frac{4\Delta x}{4x-2} + \frac{3\Delta z}{3z+5}$$



## Глава 3. Построение графиков

При малейшей возможности экспериментальное исследование должно сводиться к изучению зависимостей, так как оно имеет целый ряд преимуществ перед единичным измерением. Исследование зависимости:

- гарантирует, что наблюдается закон, а не случайное совпадение;
- повышает точность результатов;
- позволяет исключить некорректные измерения (выбросы).

Проведение эксперимента по изучению зависимостей предполагает контролируемое изменение одной физической величины и измерение другой величины, зависимой от первой. Реже измеряются две зависящие друг от друга величины, меняющиеся неконтролируемым образом. В любом случае, результатом такого эксперимента является набор пар взаимосвязанных физических величин:  $(x_1; y_1), \dots, (x_N; y_N)$ . Наглядным представлением полученных данных является график зависимости  $y(x)$ .

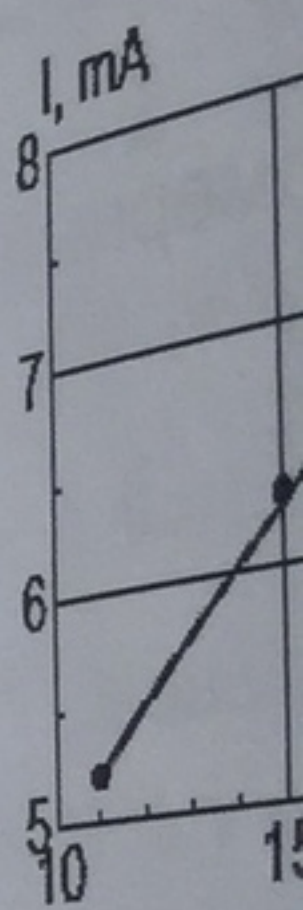
### § 1. Снятие зависимости

Важной проблемой является разумное определение числа  $N$  точек, в которых проводятся измерения. Если этих точек мало, то вид зависимости по графику определить невозможно, если слишком много, то не хватает отведенного времени на проведение измерений. Для построения прямой пропорциональной зависимости необходимо получить минимум 10 экспериментальных точек, точное число определяется при проведении эксперимента из следующих соображений.

- Максимальный диапазон измерений. Пределы изменения чаще всего ограничены. Причиной может быть: геометрические размеры установки, ограниченность приборов и т.д. Необходимо измерить точки, равномерно распределенные по всему доступному диапазону.
- Минимальный шаг. Изменение хотя бы одной физической величины должно быть надежно регистрируемо (доверительные интервалы соседних точек не пересекаются). В идеале обе измеряемые величины подчиняются этому правилу, однако так бывает не всегда.
- Особенности графика. При наличии максимумов, минимумов, разрыва, излома и т.д. густота точек вблизи этих особенностей должна быть увеличена.

Графики должны легко читаться, для этого необходимо соблюдать некоторые общие правила, изложенные ниже.

§ 2. Рекомен  
обязательно  
чтобы он за  
могут нач  
график за  
Кроме слу  
такого гр  
оставаться  
последнего



пр

### § 3.

Постро  
масштаба

- Оси со
- Оси бе
- Коорд
- штрих



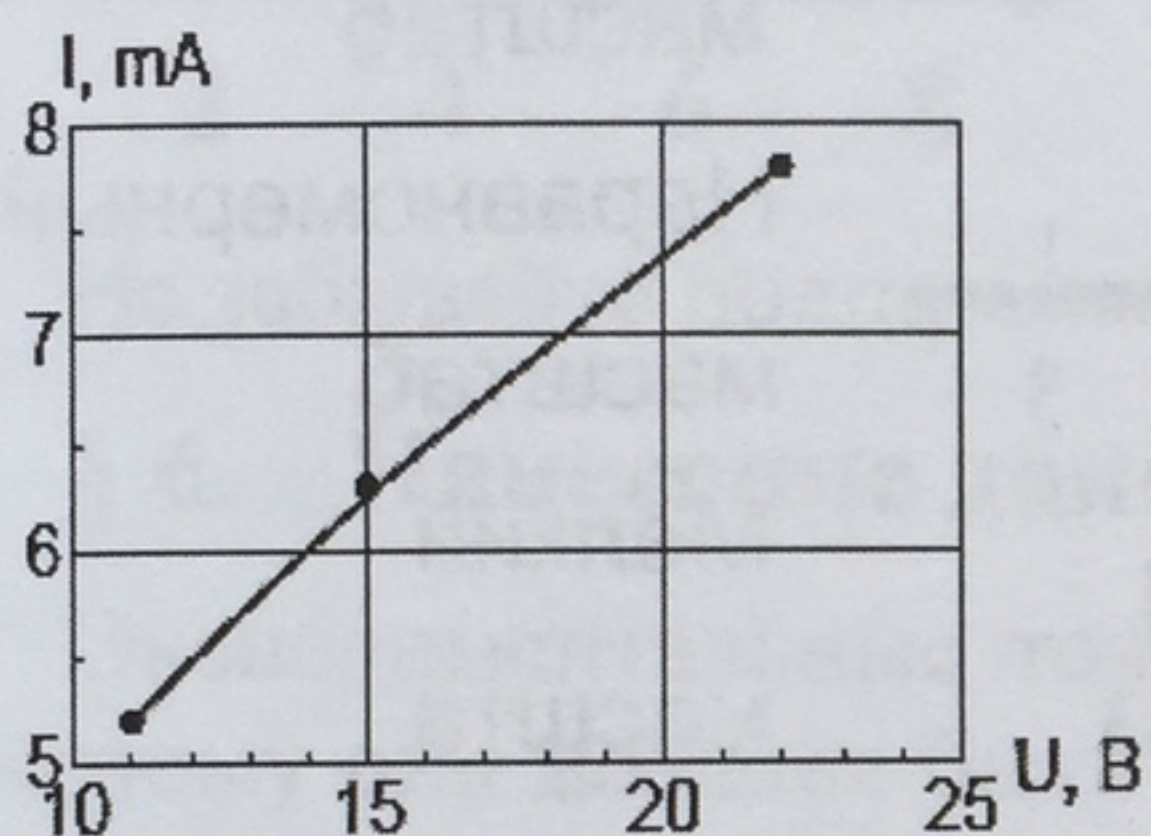
оси со

Обыч

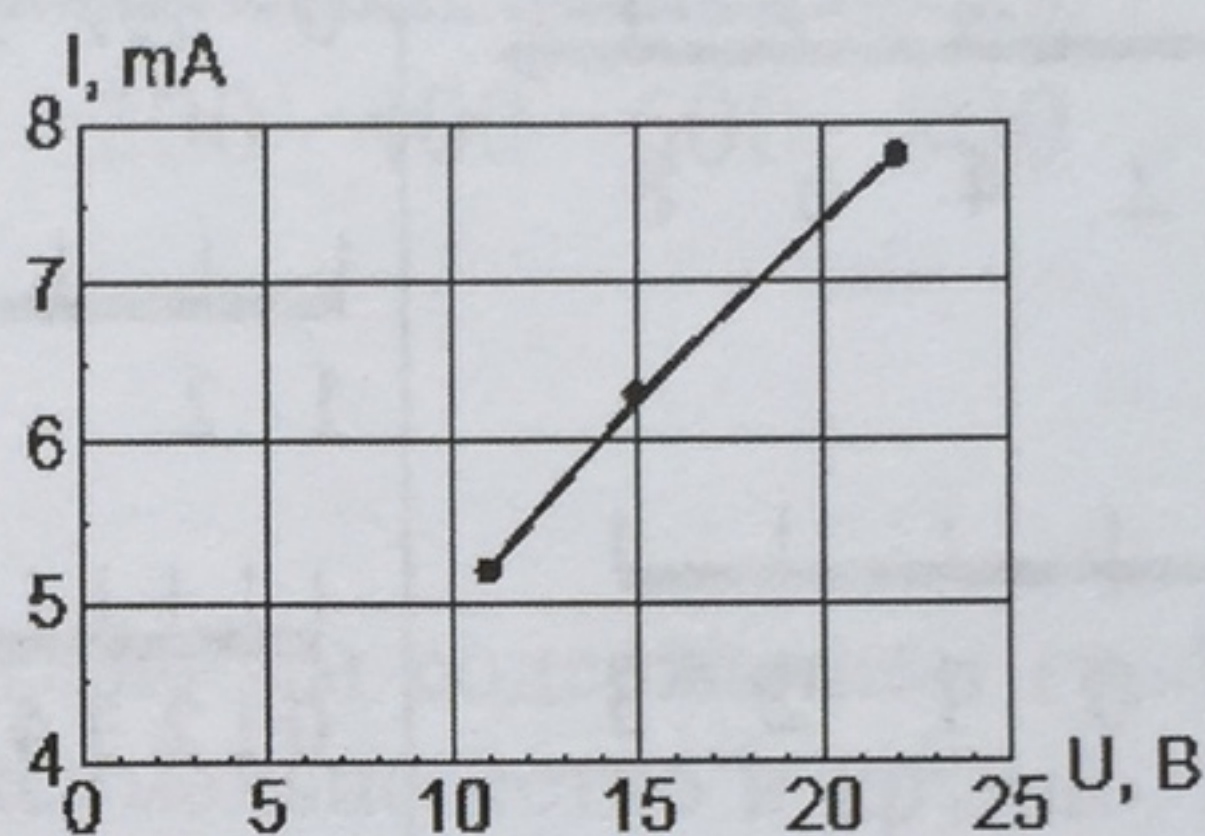


## § 2. Расположение графика

Рекомендуется ориентировать графики горизонтально, однако это не обязательно. Масштаб графика должен быть выбран таким образом, чтобы он занимал не менее  $\frac{2}{3}$  листа формата А4 (ориентировочно). Оси могут начинаться не с нуля, а с любого удобного значения, чтобы график занимал наибольшее пространство на координатной плоскости. Кроме случая прямой пропорциональной зависимости – при обработке такого графика необходима точка (0;0). На графике не должно оставаться пустых мест, все точки должны располагаться внутри последнего деления оси.



правильно

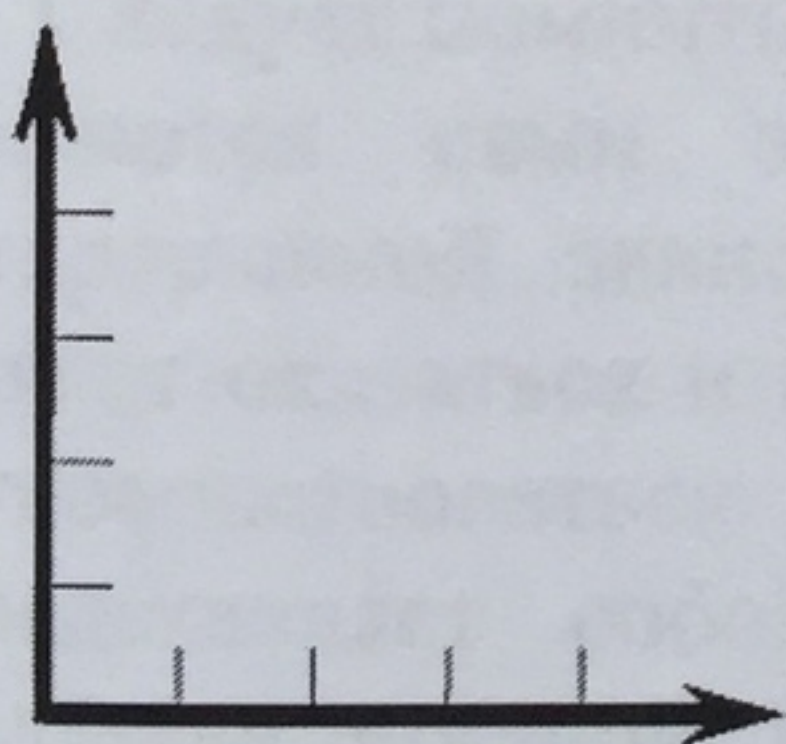


неправильно

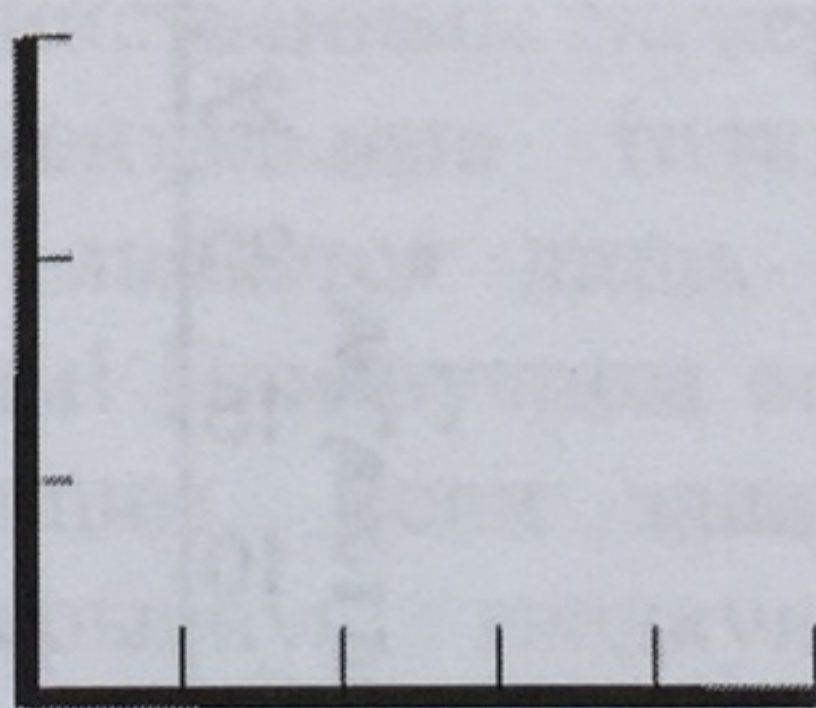
## § 3. Система координат

Построение графиков начинается с выбора осей и нанесения масштаба. Координатные оси бывают трех видов.

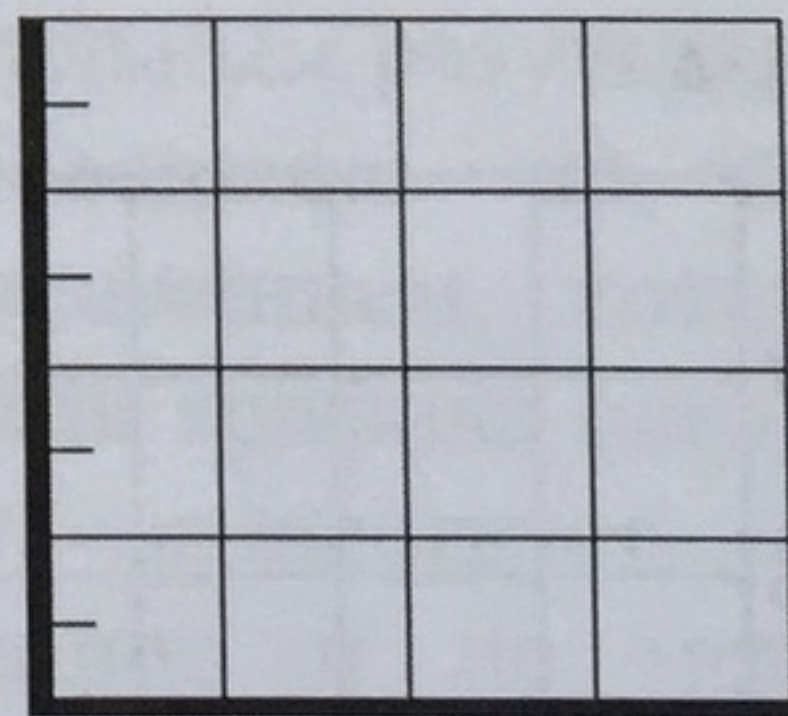
- Оси со стрелками.
- Оси без стрелок, оканчиваются координатными штрихами.
- Координатная сетка, стрелок нет, можно с дополнительными штрихами.



оси со стрелками



оси без стрелок



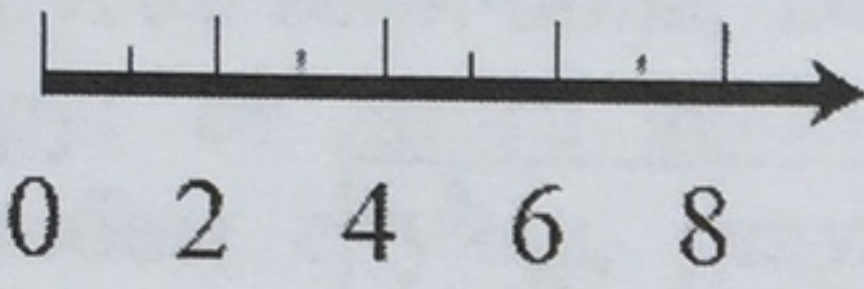
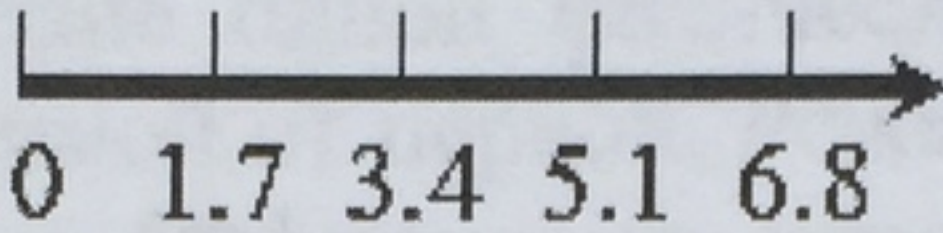
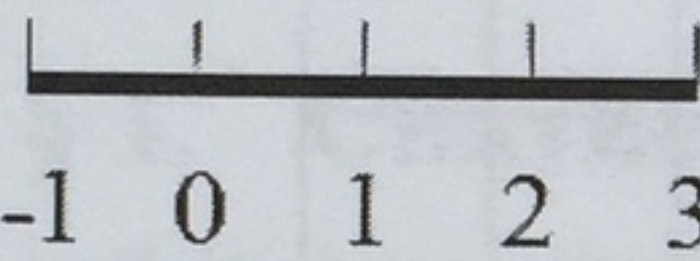
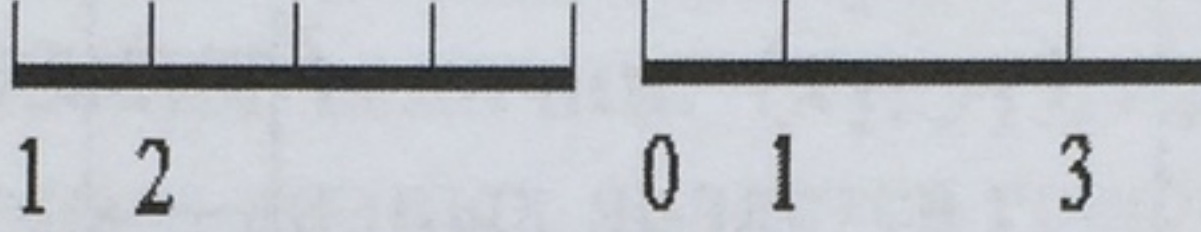
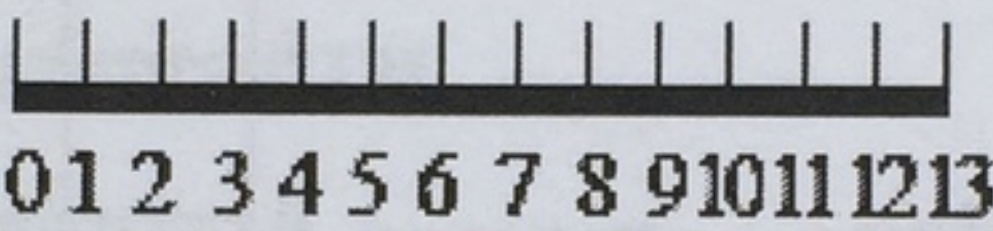
координатная сетка

Обычно используют первый тип, но это дело вкуса экспериментатора.



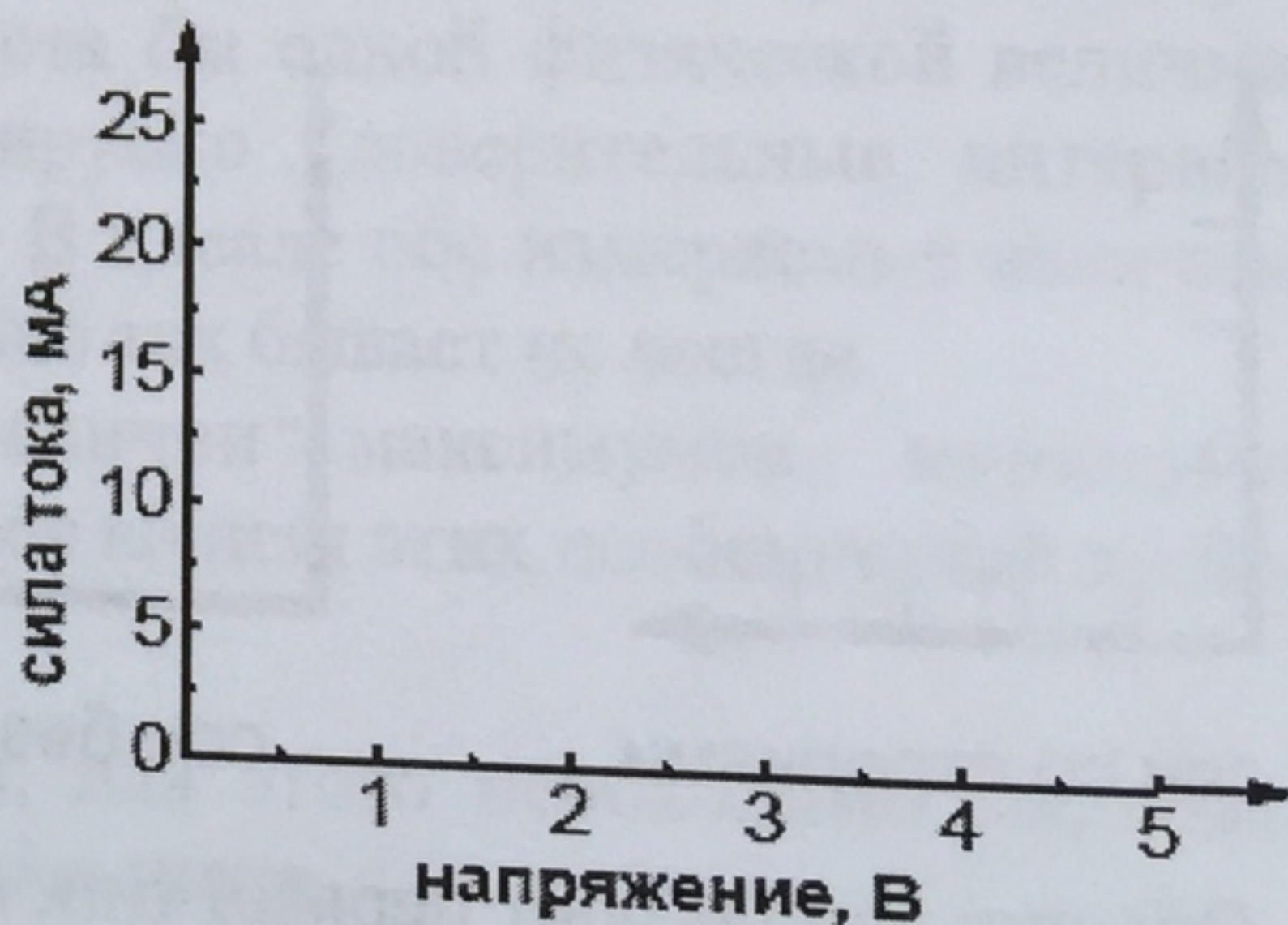
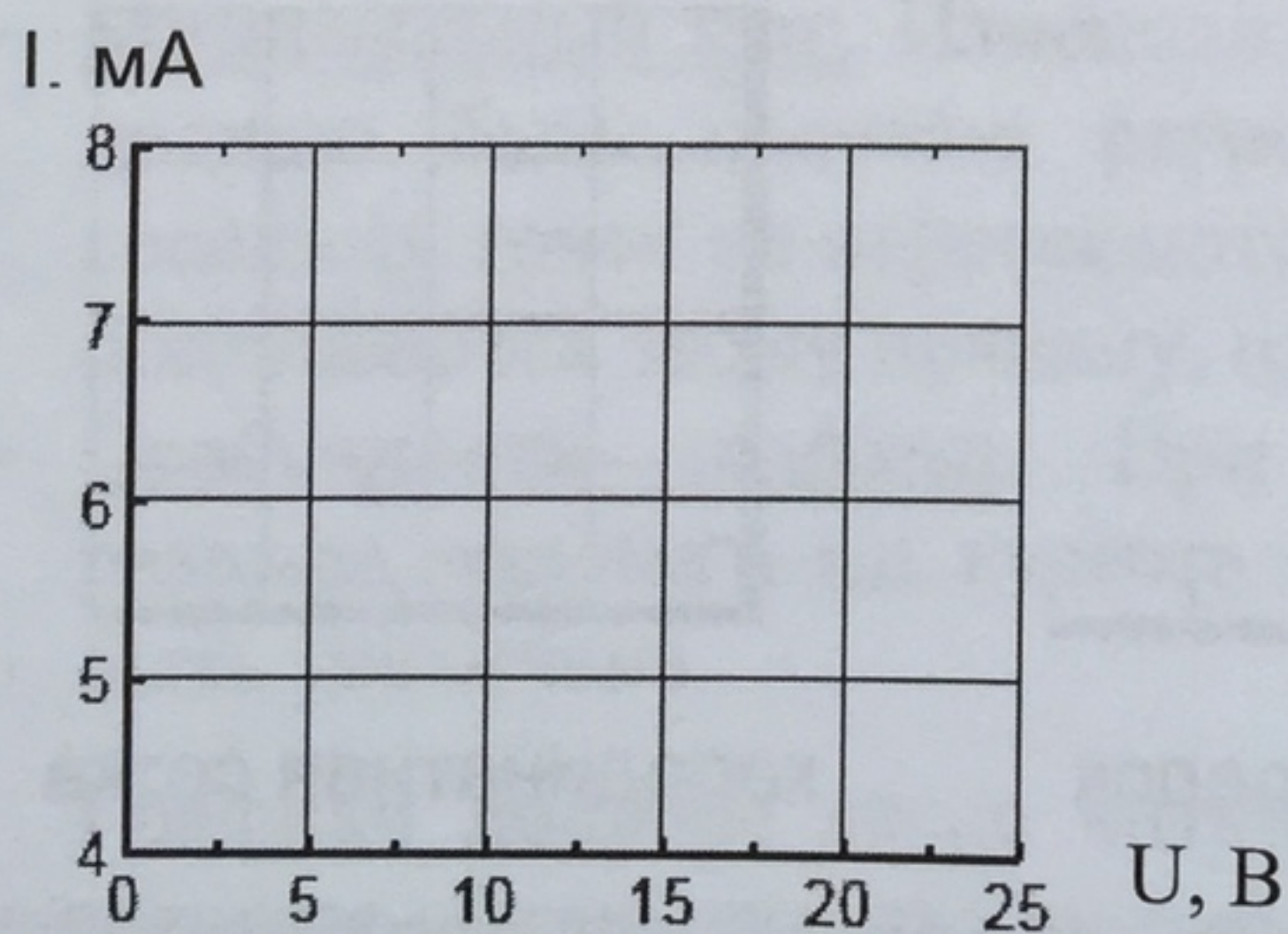
## § 4. Оцифровка

На осях делают от 5 до 10 делений, слишком частые или редкие деления затрудняют восприятие. Измеренные значения на шкалы не наносят! Ось - это рабочая линейка. Масштаб выбирают удобным для считывания, он сохраняется на всей оси. Лучше всего выбирать масштаб с шагом 1, 2, 5.

Пример правильно нарисованных осей.	Пример неправильно нарисованных осей.	
		Неудобный масштаб
		Неравномерный масштаб
		Мелкий масштаб

Бывают ситуации, когда целесообразно использовать разные масштабы для разных частей графика. В таких случаях для отделения областей с разными масштабами применяются так называемые разрывы осей, обозначаемые специальным знаком  $//$ . Если изменение масштаба происходит в начале координат, то знак разрыва можно не ставить. Разрывами осей надо пользоваться с осторожностью, поскольку они искажают визуальный ход графика и затрудняют его восприятие.

## § 5. Подпись координатной оси



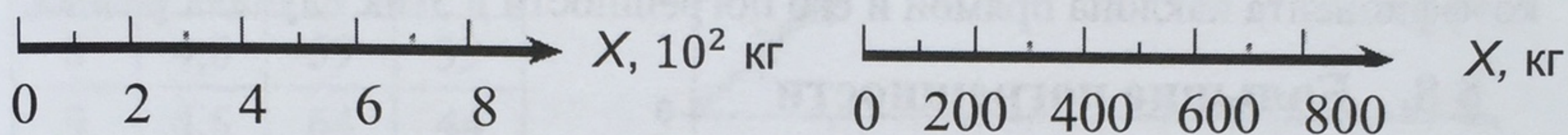


Переменную величину можно обозначать тремя способами.

- Наименованием, то есть непосредственно написать словами, что отложено по осям. Располагается такая надпись по центру вдоль оси.
- Символом (общепринятым). Располагается в конце оси.
- Математическим выражением. Располагается в конце оси.

Единицы измерения пишутся сразу после обозначения через запятую.

Чтобы не писать нулей, повторяющихся во всех цифрах и засоряющих график, множитель  $10^n$  выносят (в обоих приведенных на рисунке вариантах масштаб одинаков).

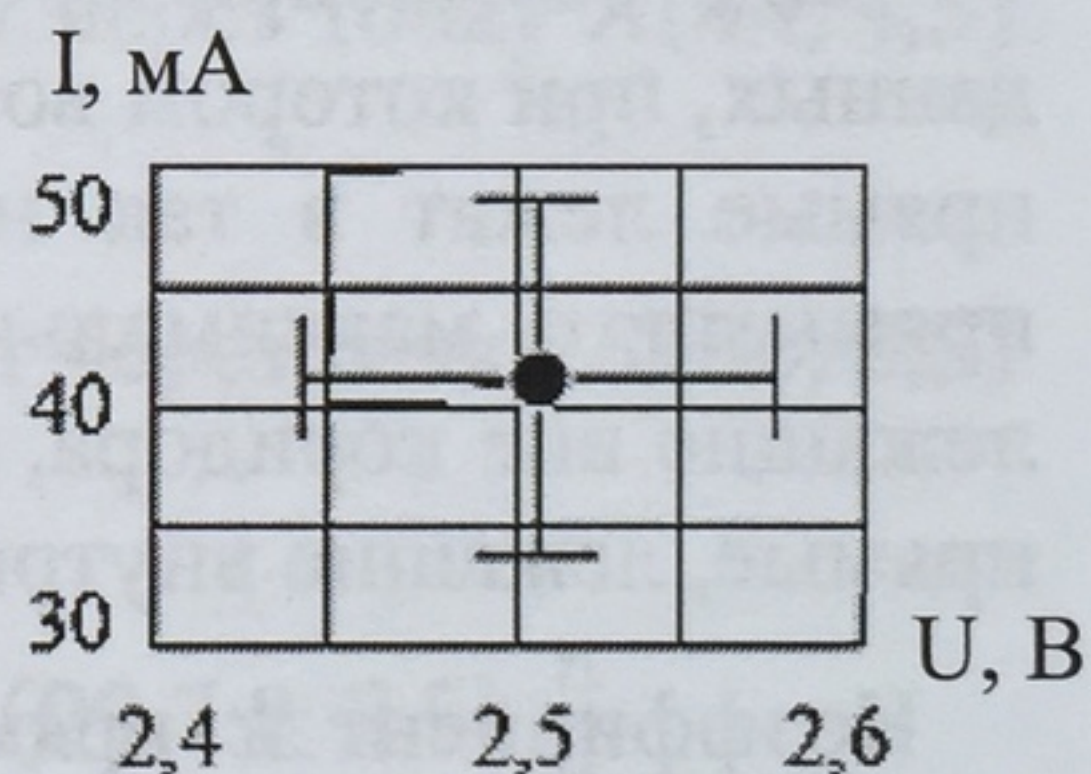


Не забывайте подписывать графики!

## § 6. Нанесение данных

Экспериментальные точки являются главным содержанием графика, поэтому они должны быть показаны максимально четко и крупно. Если на графике показаны несколько наборов точек, каждый набор нужно показать своими символами (кружки, крестики, квадраты, треугольники). Погрешности измерения каждой точки указываются отрезками, длина которых равна величине ошибки. Например, на рисунке нанесена точка:

$$U = (2,51 \pm 0,07) \text{ В}, \quad I = (41 \pm 7) \text{ мА}$$



## § 7. Проведение зависимости

Следует помнить, что единственным экспериментальным результатом являются сами экспериментальные точки. Проведение по ним непрерывной зависимости является лишь предположением, которое может оказаться и неверным! При ручном построении графика следует руководствоваться следующим. Если зависимость существует, она представляет собой непрерывную гладкую функцию и не может являться ломаной. Поэтому, экспериментальные точки не соединяются, кривая лишь должна пройти в пределах ошибок измерений. Иногда на графиках встречаются особенности: изломы, сдвиги, и т. д. Такие особенности необходимо описывать и объяснять с точки зрения теории.



Легче всего проводить обработку прямой пропорциональной зависимости, обработка линейной зависимости чуть сложнее, но принципиально не отличается. Если же зависимость нелинейная, соответствующим преобразованием переменных ее, как правило, можно привести к линейному виду.

Построение графика не только иллюстрирует линейную зависимость, но так же и позволяет находить параметры этой зависимости, такие как угловой коэффициент прямой. И, что немало важно, проводить оценку его погрешности. Как правило, систематические погрешности измерений или больше случайных, или пренебрежимо малы. Идея расчета коэффициента наклона прямой и его погрешности в этих случаях разная.

## § 8. Большие погрешности

Допустим, из теории известно, что полученные экспериментальные данные  $(x_1; y_1), \dots, (x_N; y_N)$  должны описываться прямой пропорциональной зависимостью  $y = kx$ . То есть, если закон верен, то на графике через точки проведется прямая, выходящая из начала координат. Следует отметить, что прямая должна пройти через погрешности всех точек, однако не обязана проходить через сами точки.

Чаще всего, при проведении эксперимента получается такой набор данных, при котором возможно проведение целого ряда прямых. Все эти прямые лежат в так называемом коридоре – области, ограниченной прямыми с максимальным и минимальным углом наклона. Прямые, лежащие вне коридора, проходят не через все погрешности точек. А все прямые, лежащие внутри коридора, подходят под условие задачи.

Коэффициент  $k$  прямой легко определить через координаты любой принадлежащей ей точки  $(x_0; y_0)$ :  $k = \frac{y_0}{x_0}$ . Угловые коэффициенты крайних прямых образуют отрезок  $(k_{min}; k_{max})$ . Этот отрезок и является доверительным интервалом для углового коэффициента прямой.

Разберем пример определения коэффициента жесткости пружины при помощи графика. Измерим длину  $x$  образца при различной приложенной силе  $F$  (данные приведены в таблице). Для эксперимента использовались линейка ( $\Delta d = 1$  мм) и динамометр ( $\Delta F = 0,1$  Н). Рассчитаем деформацию пружины  $d_i = x_i - x_0$ . Сила упругости, возникающая в пружине, равна приложенной силе. Согласно закону Гука зависимость  $F(d)$  является прямой пропорциональностью и описывается уравнением  $F = k \cdot d$ . Построим график зависимости  $F(d)$ .

N	F, Н
0	0,0
1	0,5
2	1,0
3	1,5
4	2,0
5	2,5
6	3,0
7	3,5
8	4,0
9	4,5
10	5,0

Рассмотрен  
3 Н длина пр  
перемерить и  
Построим кор

Прямая с мин  
Соответствен

Прямая с макс  
Соответствен

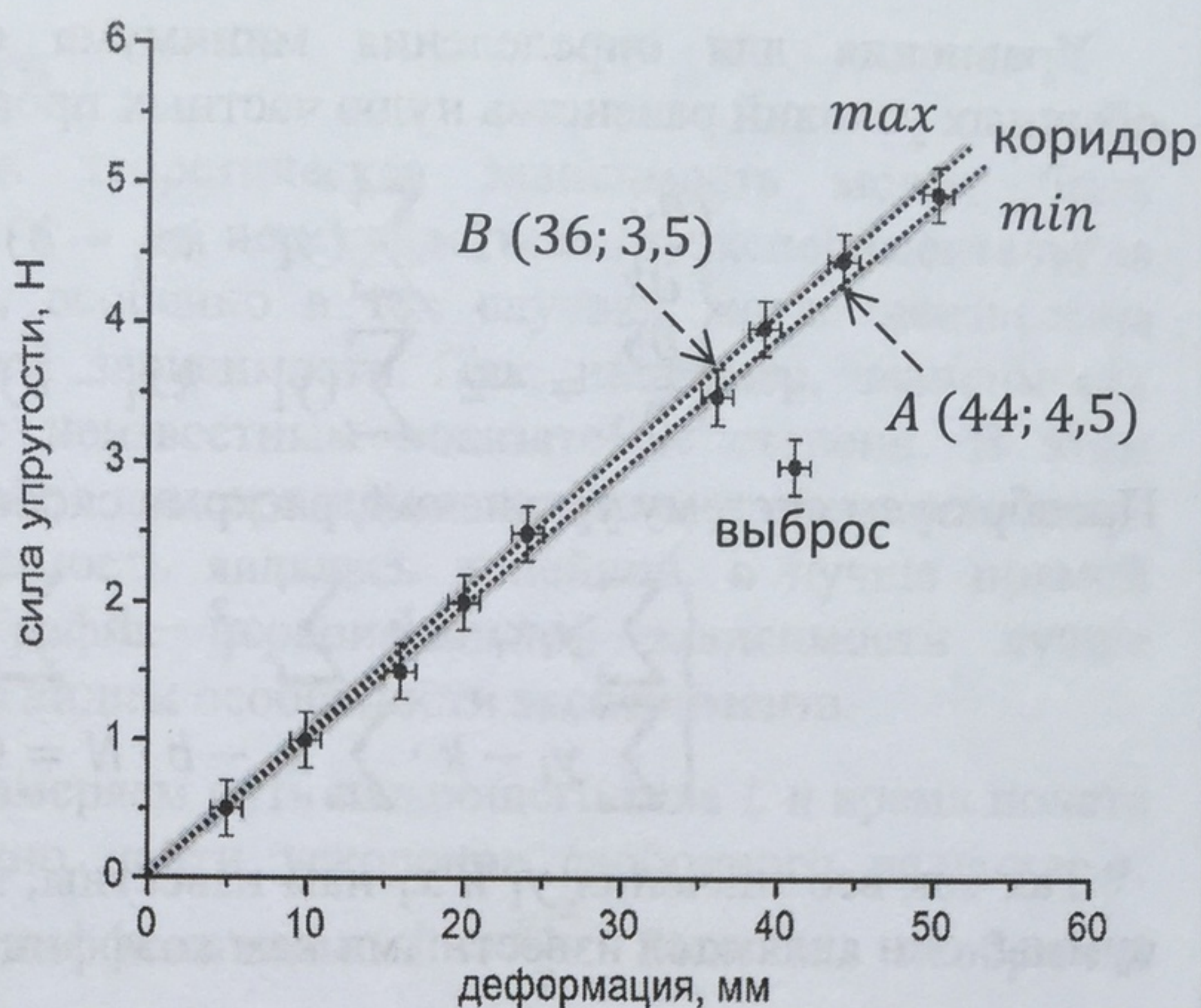
Итого, коэф

## § 9. Мал

Допустим, с  
ложиться на пр  
Для получения  
всего использ  
математиком К  
заключается в  
при котором су  
у<sub>i</sub> от теоретиче



$N$	$F, \text{Н}$	$x, \text{мм}$	$d, \text{мм}$
0	0,0	20	0
1	0,5	25	5
2	1,0	30	10
3	1,5	36	16
4	2,0	40	20
5	2,5	44	24
6	3,0	61	41
7	3,5	56	36
8	4,0	59	39
9	4,5	64	44
10	5,0	70	50



Рассмотрение результатов, прежде всего, показывает, что при силе 3 Н длина пружины, видимо, измерена неверно. Эту точку следует перемерить или не рассматривать при обработке графика (выброс). Построим коридор и рассчитаем коэффициент жесткости пружины.

Прямая с минимальным углом наклона проходит через точку  $A(44; 4,5)$ . Соответственно  $k_{min} = \frac{4,5 \text{ Н}}{44 \text{ мм}} = 102,27 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ .

Прямая с максимальным углом наклона проходит через точку  $B(36; 3,5)$ . Соответственно  $k_{max} = \frac{3,5 \text{ Н}}{36 \text{ мм}} = 97,22 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ .

Итого, коэффициент жесткости пружины  $k = (99,7 \pm 2,5) \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ .

## § 9. Малые погрешности

Допустим, систематические погрешности малы. Тогда точки должны ложиться на прямую, но из-за случайных факторов наблюдается разброс. Для получения значения коэффициента наклона и его погрешности чаще всего используется метод наименьших квадратов, разработанный математиком Карлом Гауссом в начале XIX века. Основная идея метода заключается в таком выборе параметров  $k$  и  $b$  зависимости  $y = kx + b$ , при котором сумма квадратов отклонений экспериментальных значений  $y_i$  от теоретических  $kx_i + b$  была минимальна.

$$S = \sum (y_i - (kx_i + b))^2 \rightarrow \min$$



Уравнения для определения минимума функции  $S$  следуют из обычных условий равенства нулю частных производных:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial k} = -2 \cdot \sum (y_i - kx_i - b) \cdot x_i = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial b} = -2 \cdot \sum (y_i - kx_i - b) = 0 \end{cases}$$

Преобразуем систему уравнений, раскрыв скобки.

$$\begin{cases} \sum y_i x_i - k \cdot \sum x_i^2 - b \cdot \sum x_i = 0 \\ \sum y_i - k \cdot \sum x_i - b \cdot N = 0 \end{cases}$$

Так как все значения  $y_i$  и  $x_i$  нам известны, мы можем рассчитать эти суммы, они являются известными нам коэффициентами.

$$\begin{cases} k = \frac{N \cdot \sum y_i x_i - (\sum x_i) \cdot (\sum y_i)}{N \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{\frac{\sum y_i x_i}{N} - \frac{\sum x_i}{N} \cdot \frac{\sum y_i}{N}}{\frac{\sum x_i^2}{N} - \left(\frac{\sum x_i}{N}\right)^2} \\ b = \frac{(\sum x_i^2) \cdot (\sum y_i) - (\sum y_i x_i) \cdot (\sum x_i)}{N \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{\frac{\sum x_i^2}{N} \cdot \frac{\sum y_i}{N} - \frac{\sum y_i x_i}{N} \cdot \frac{\sum x_i}{N}}{\frac{\sum x_i^2}{N} - \left(\frac{\sum x_i}{N}\right)^2} \end{cases}$$

Введем обозначения:

- средние значения
- дисперсии
- коэффициент ковариации

$$\frac{\sum x_i}{N} = x_{\text{ср}} \quad \text{и} \quad \frac{\sum y_i}{N} = y_{\text{ср}}$$

$$\sigma_x^2 = \frac{\sum x_i^2}{N} - (x_{\text{ср}})^2 \quad \text{и} \quad \sigma_y^2 = \frac{\sum y_i^2}{N} - (y_{\text{ср}})^2$$

$$R = \frac{\sum y_i x_i}{N} - x_{\text{ср}} \cdot y_{\text{ср}}$$

$$\begin{cases} k = \frac{R}{\sigma^2} \\ b = y_{\text{ср}} - kx_{\text{ср}} \end{cases}$$

$$\Delta k = \sqrt{\frac{1}{N-2} \left( \frac{\sigma_y^2}{\sigma_x^2} - k^2 \right)}$$

$$\Delta b = \Delta k \sqrt{\sigma_x^2 + (x_{\text{ср}})^2}$$



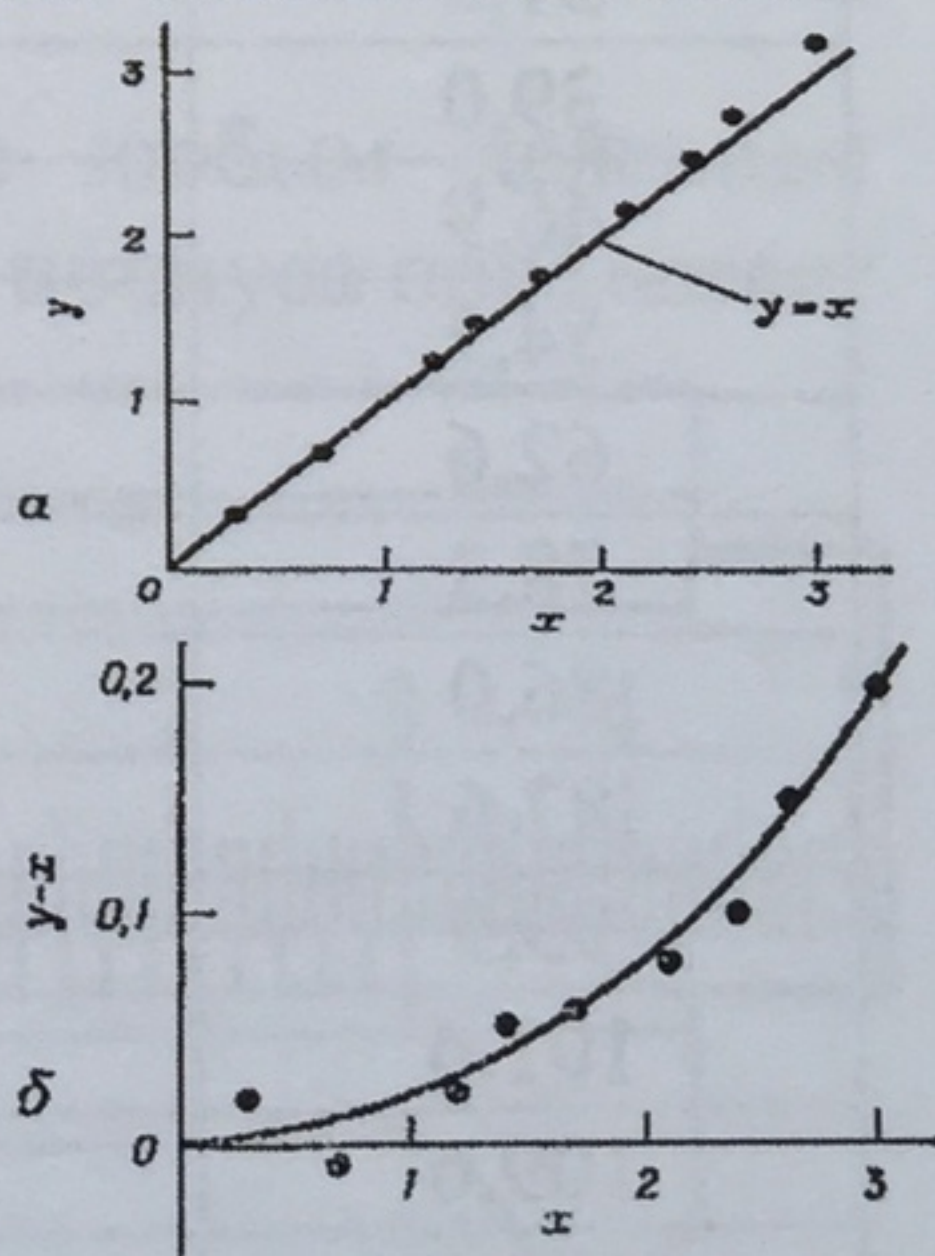
## § 10. Нелинейность

В некоторых случаях теоретическая зависимость может быть достаточно сложной, так что ее непосредственная экспериментальная проверка затруднительна, особенно в тех случаях, когда неизвестны некоторые параметры этой зависимости. Так, например, зависимость может быть степенная с неизвестным показателем степени. В этом случае необходимо провести линеаризацию графика – построить его в таких осях, чтобы зависимость являлась линейной, а лучше прямой пропорциональностью. График первоначальной зависимости лучше построить, на нем нередко видны особенности эксперимента.

Пусть, например, мы измеряем путь падающего тела  $L$  и время полета  $t$ . По этим данным нужно найти ускорение свободного падения  $g$ . Формула, связывающая эти величины:  $L = \frac{gt^2}{2}$ . Если мы изобразим результаты опыта на графике зависимости  $L(t)$ , то точки расположатся по параболе, провести которую на глаз очень трудно. Если же построить график зависимости  $L(t^2)$ , то зависимость будет прямой пропорциональностью. Вычислив коэффициент наклона прямой можно определить и  $g$ .

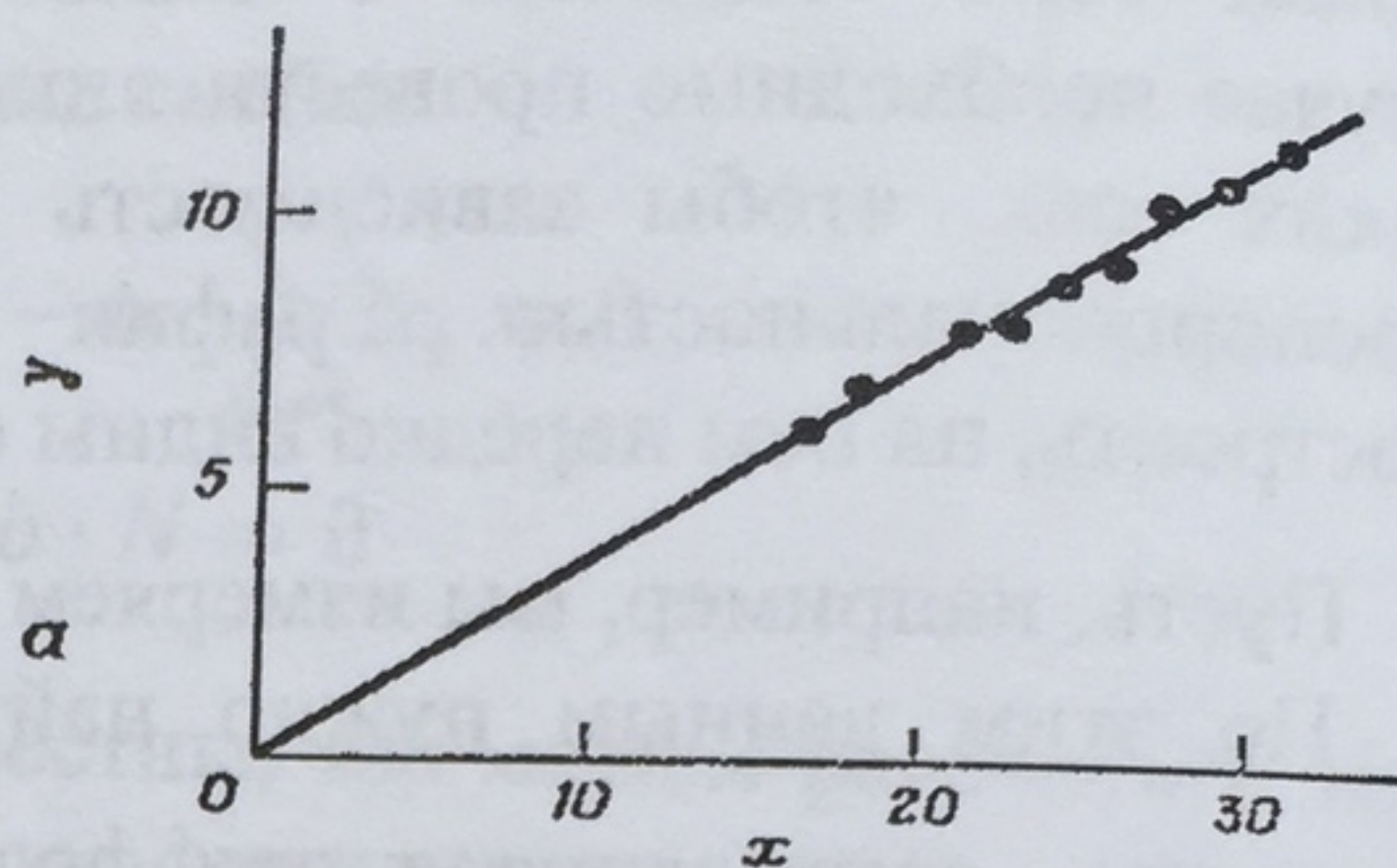
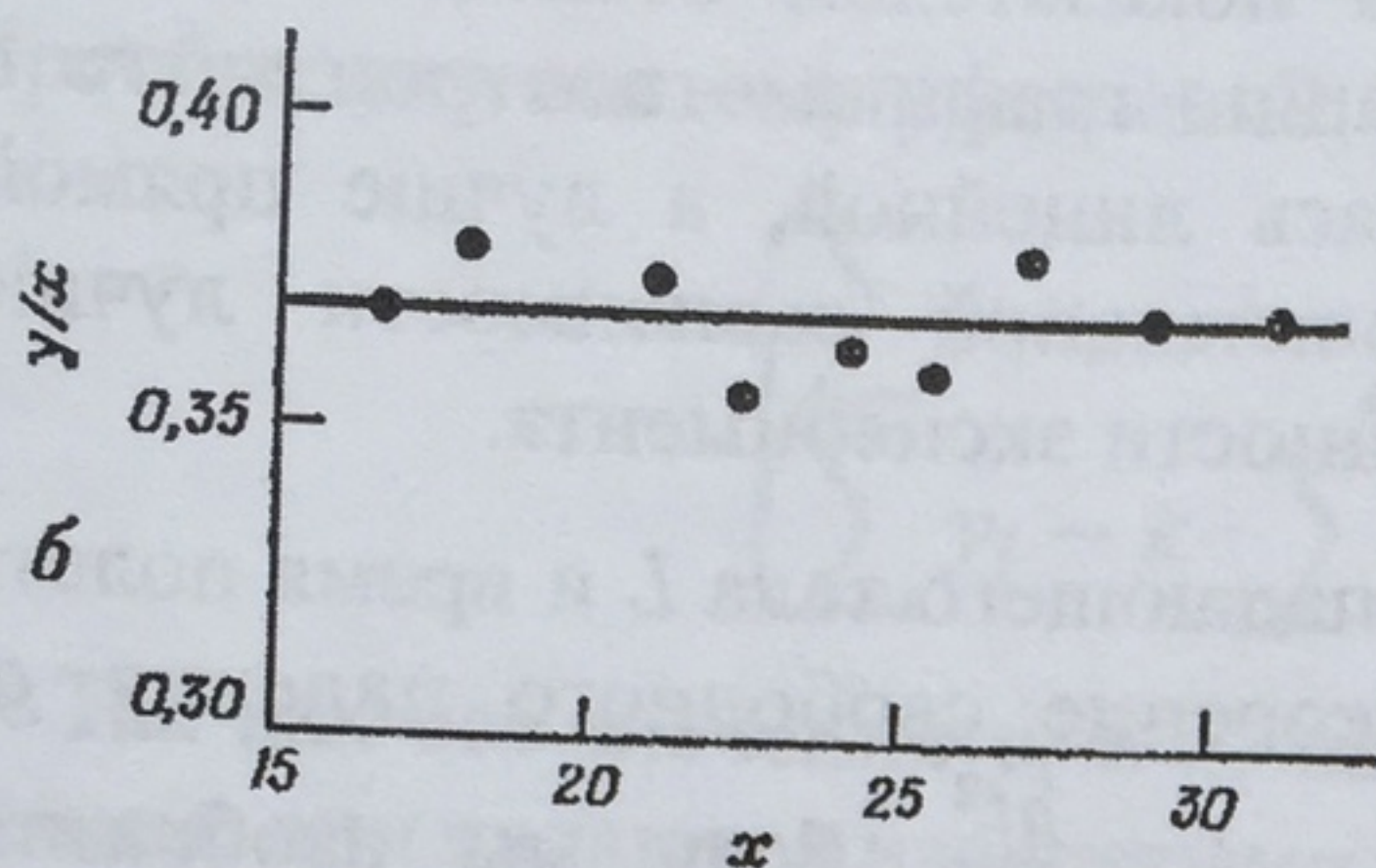
Существует ещё один математический приём, который даёт возможность одновременно установить наличие степенной зависимости между двумя величинами и найти показатель степени: логарифмирование. Допустим, исследуется зависимость  $y = kx^n$ .  $\ln y = \ln(kx^n) = \ln k + \ln(x^n) = \ln k + n \cdot \ln x$ . Вместо самой величины на оси откладывается ее логарифм, строится график зависимости  $\ln y(\ln x)$ . Если на таком графике получится прямая, значит, исследуемая зависимость именно степенная, а показатель степени можно найти по наклону прямой.

Есть еще целый ряд приемов, помогающих при анализе графиков. Допустим, что мы проводим эксперимент, целью которого является проверка закона  $y = x$ . При малых погрешностях вместо графика зависимости  $y(x)$  можно построить график зависимости  $y - x$  от  $x$ . Эта разность мала по сравнению с величиной  $y$ , можно выбрать более крупный масштаб. На первом из графиков отклонения от равенства  $y = kx$  слабо заметны, а на втором отчетливо видны.





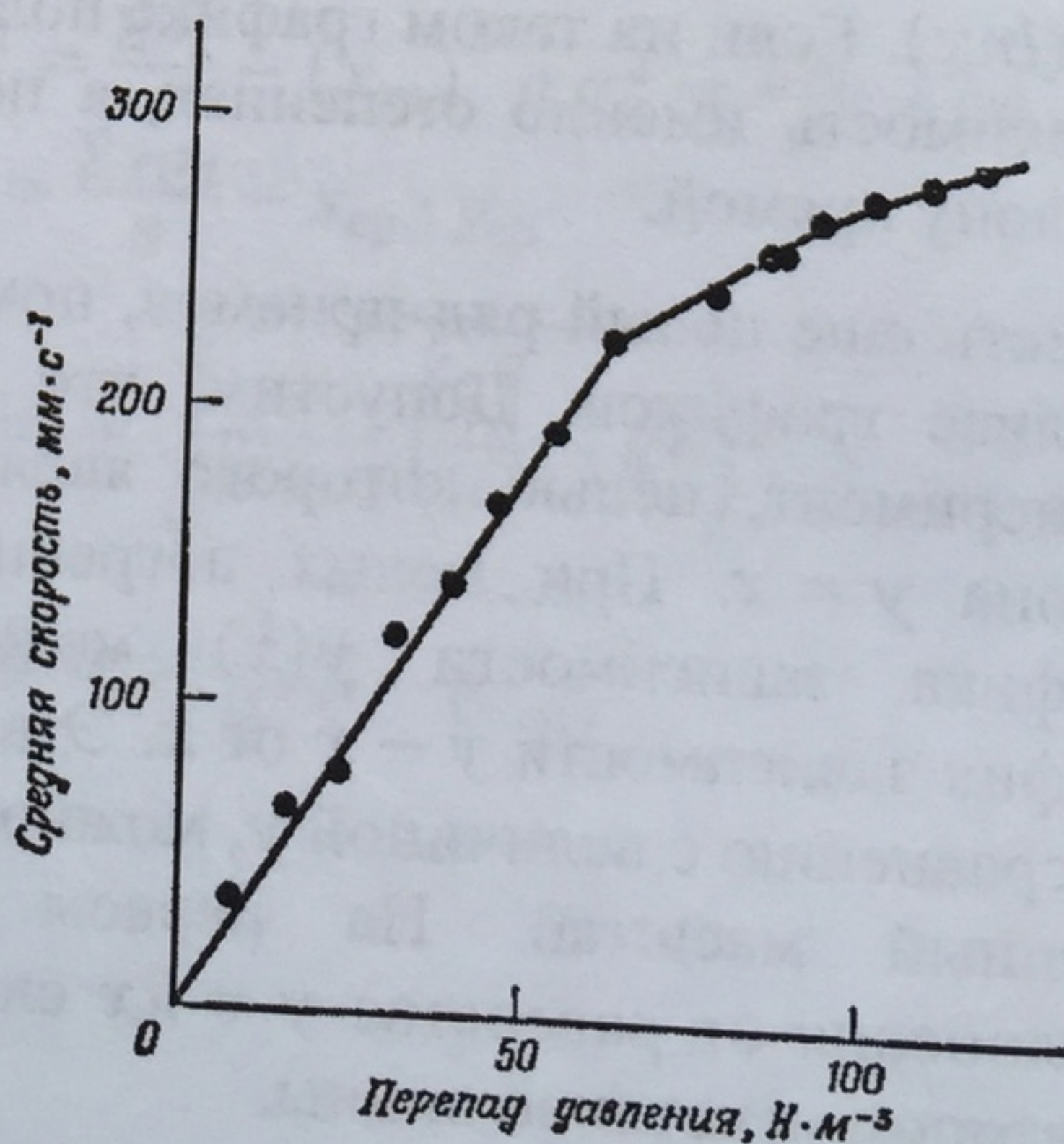
Аналогичный метод применим и при проверке соотношения  $y = kx$ . График зависимости  $y$  от  $x$  полезен тем, что дает общее представление о ее характере. Но более показательным при проверке данного соотношения будет график зависимости  $\frac{y}{x}$  от  $x$ . В этом случае на графике не обязательно отмечать начало координат, можно выбрать больший масштаб.



Нередко оказывается, что в разных диапазонах аргумента зависимость описывается разными функциями. Например, исследуем течение воды по трубке: поток может быть ламинарным или турбулентным. Снимем зависимость скорости течения воды от перепада давления, полученные данные приведены в таблице. Пока поток остается ламинарным, скорость его пропорциональна перепаду давления. Глядя на цифры, трудно сказать, где пропорциональность начинает нарушаться.

Перепад давления, Н/м <sup>3</sup>	Средняя скорость, мм/с
7,8	35
15,6	65
23,4	78
31,3	126
39,0	142
46,9	171
54,7	194
62,6	226
78,3	245
86,0	258
87,6	258
93,9	271
101,6	277
109,6	284
118,0	290

Другое дело, когда те же данные представлены графически. В этом случае сразу видна точка, в которой нарушается пропорциональность.



предназначен для измерения глубин, длин миллиметровым нониусом — дополнением основной шкалы. Выбирается точная шкала, N — натуры нониуса (нулевая риска нониуса следующей рисунком нониуса снова измерений нуля для первой рисунком, если нуль нониуса смещен

Порядок проведения измерений

1. Проверить нулевую отсчитку основной линейки.
2. Зажать измерительные губки.
3. Произвести измерение нониуса.
4. Найти на основной линейке доли миллиметра.

Пример измерения показан на рисунке. До нуля линейки 11 делений основной шкалы, третья часть деления измерения 11,3 мм.



## Глава 4. Приборы и оборудование

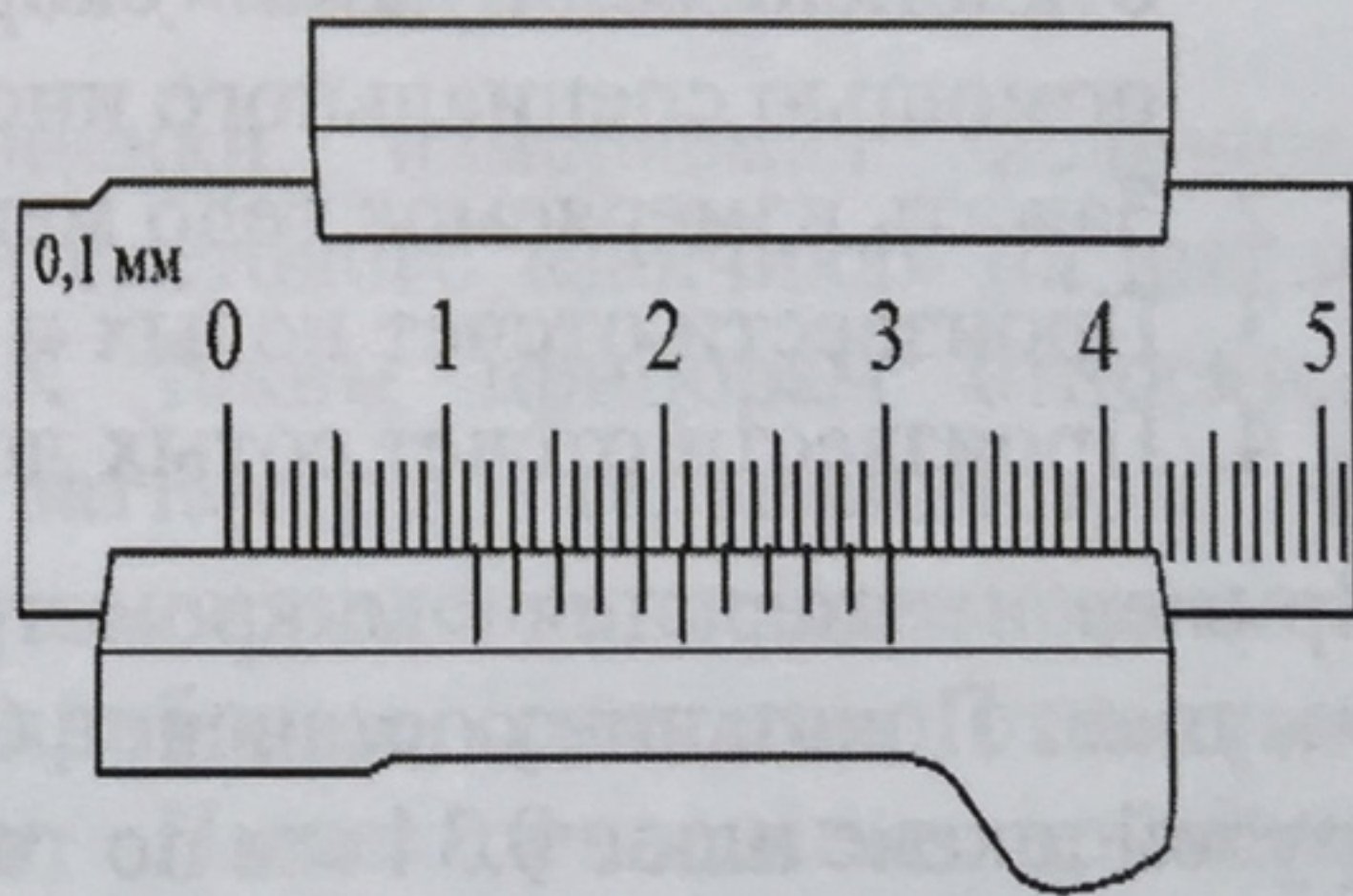
### § 1. Штангенциркуль

Штангенциркуль – универсальный измерительный инструмент, предназначенный для нахождения наружных и внутренних диаметров, глубин, длин. Основной частью штангенциркуля является линейка с миллиметровыми делениями. Кроме того в штангенциркуль встроен нониус – дополнительная линейка, которая может перемещаться вдоль основной. С его помощью производят отсчет дольных частей миллиметра. Деления на шкале нониуса наносятся следующим образом. Выбирается точность нониуса  $\delta = \frac{c}{N}$ , где  $c$  – цена деления основной шкалы,  $N$  – натуральное число (обычно 10 или 20). Если совместить нуль нониуса (нулевая риска) с одним из делений основной шкалы, то первая риска нониуса наносится так, чтобы она отставала относительно следующей риски шкалы на  $\delta$ , вторая – на  $2\delta$ . Последняя  $N$  риска нониуса снова совпадает с одной из рисок шкалы. Если в процессе измерений нуль нониуса сместить вправо на  $\delta$ , мы увидим совпадение для первой риски нониуса, на  $2\delta$  – для второй риски и т. д. Таким образом, если при измерении  $n$  риска нониуса дала совпадение, значит, нуль нониуса смещен вправо на  $n\delta$ .

Порядок проведения измерений с помощью штангенциркуля:

1. Проверить установку нуля: при сдвинутых губках штангенциркуля нулевая отметка нониуса должна совпадать с нулевой отметкой основной линейки.
2. Зажать измеряемое тело между губками штангенциркуля.
3. Произвести отсчет целых делений по основной шкале до нуля нониуса.
4. Найти на нониусе деление, совпадающее с любым делением основной шкалы штангенциркуля. Это деление нониуса показывает доли миллиметра.

Пример измерения штангенциркулем показан на рисунке. Точность нониуса 0,1 мм. До нуля нониуса на основной линейке 11 делений (11 мм). С одним из делений основной шкалы совпадает третье деление нониуса. Результат измерения 11,3 мм.





## § 2. Микрометр

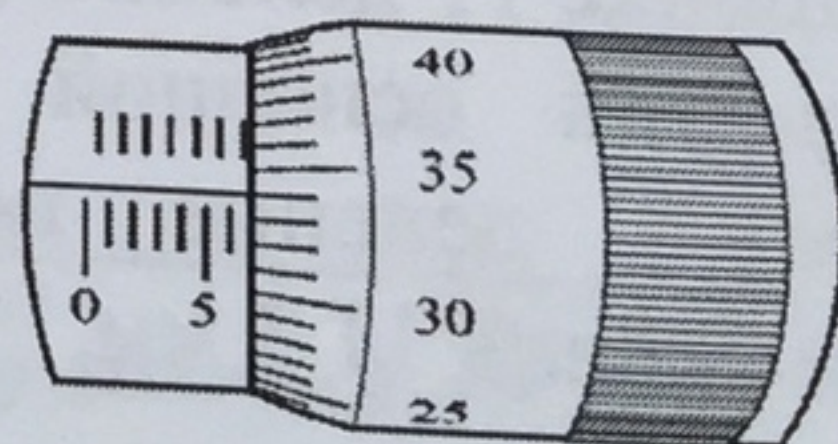
Микрометр — профессиональный измерительный инструмент, предназначенный для точного измерения изделий малого размера. Прибор состоит из скобы, оборудованной «пяткой», внутреннего цилиндра, барабана, навинчивающегося сверху и трещотки. На внутренний цилиндр нанесены две шкалы: основная шкала с делениями в 1 мм и дополнительная шкала с делениями, смещенными на 0.5 мм. На барабан нанесены деления для отсчёта сотых долей миллиметра, обычно она содержит 50 делений (цена деления 0.01 мм). Механизм откалиброван так, что один поворот барабана дает смещение внутреннего цилиндра на 0.5 мм, то есть на одно деление линейной грубой шкалы. Отсчет по микрометрической шкале проводится по делению барабана, совпадающему с неподвижной продольной риской, вдоль которой нанесены деления грубой шкалы. Результат получается суммированием показаний двух шкал с учетом цены их делений.

Основным источником ошибок при измерении микрометром является зависимость показаний от прижимающего усилия. Винт с малым шагом превращает незначительные усилия руки, поворачивающей барабан микрометра, в большие силы, действующие на предмет. Кроме того, небольшие деформации предмета влияют на показания. Чтобы уменьшить ошибку, связанную со слишком сильным и неодинаковым сжатием, рукоятка микрометра снабжена специальной трещоткой, позволяющей создавать постоянное давление на измеряемый объект. **Вращение непосредственно самого барабана при зажиме измеряемой детали не допустимо!** Иначе можно повредить микрометрическую резьбу винта.

### Порядок проведения измерений с помощью микрометра:

1. Проверить установку нуля. Если отклонение мало, в результате измерений учитывается систематическая ошибка. При больших отклонениях нужно скорректировать положение барабана с помощью специального инструмента.
2. Зажать измеряемое тело между «пяткой» и внутренним цилиндром.
3. Произвести отсчет целых и половинных делений по грубой шкале.
4. Произвести отсчет сотых долей по шкале на барабане.

Пример измерения микрометром показан на рисунке. Показание составляет 6,84 мм: 6,5 мм по грубой шкале плюс 0.34 мм по точной шкале.





### § 3. Весы лабораторные

Весы — устройство или прибор для определения массы тел по действующему на них весу, приближённо считая его равным силе тяжести. По принципу действия весы можно разделить на следующие категории: рычажные, пружинные, тензометрические, гидростатические, гидравлические. Школьные лабораторные весы устроены по принципу рычага и имеют предельную нагрузку 200 г. Основными частями прибора являются: платформа с двумя калибровочными винтами, коромысло, чашки, дополнительная шкала с ползунком (предел 5 г, цена деления 0,2 г), стрелочка. В качестве разновесов используется набор гирь: 5 г, 10 г, 20 г (2 шт), 50 г, 100 г. Дополнительная характеристика весов — чувствительность: минимальная масса, выводящая весы из положения равновесия. У школьных лабораторных весов чувствительность 0,1 г.

Порядок проведения измерений с помощью весов:



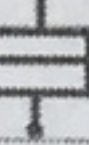
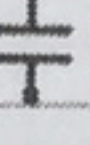
1. Сместить ползунок на «0». Выровнять положение коромысла при помощи калибровочных винтов. Стрелочка указывает равновесие.
2. Сместить ползунок, определить чашечку, на которую идет нагрузка. Смещение ползунка по шкале эквивалентно дополнительной гирьке на этой чашечке.
3. На другую чашечку положить взвешиваемое тело. Уравновесить тело гирьками и смещением ползунка.
4. Результат измерения — сумма масс гирек и массы, показываемой ползунком по шкале.

### § 4. Электроизмерительные приборы

Электроизмерительные приборы можно классифицировать по многим признакам: измеряемая физическая величина, принцип действия, метод измерения (оценка и сравнение), способ представления результатов измерений, назначение, способ применения (конструкция).

В приборах непосредственной оценки измеряемая величина определяется по показанию стрелки или светового «зайчика» на шкале прибора или по цифровому табло. К таким приборам относятся амперметры, вольтметры, омметры, ваттметры, гальванометры. В приборах сравнения измеряемая величина определяется сравнением с известной однородной величиной. К приборам сравнения относятся компенсаторы и электрические мосты. Ниже приведены примеры обозначений, указываемых на корпусе приборов.



Система прибора	Условное обозначение
Магнитоэлектрическая	
Электромагнитная	
Электродинамическая	
Электростатическая	

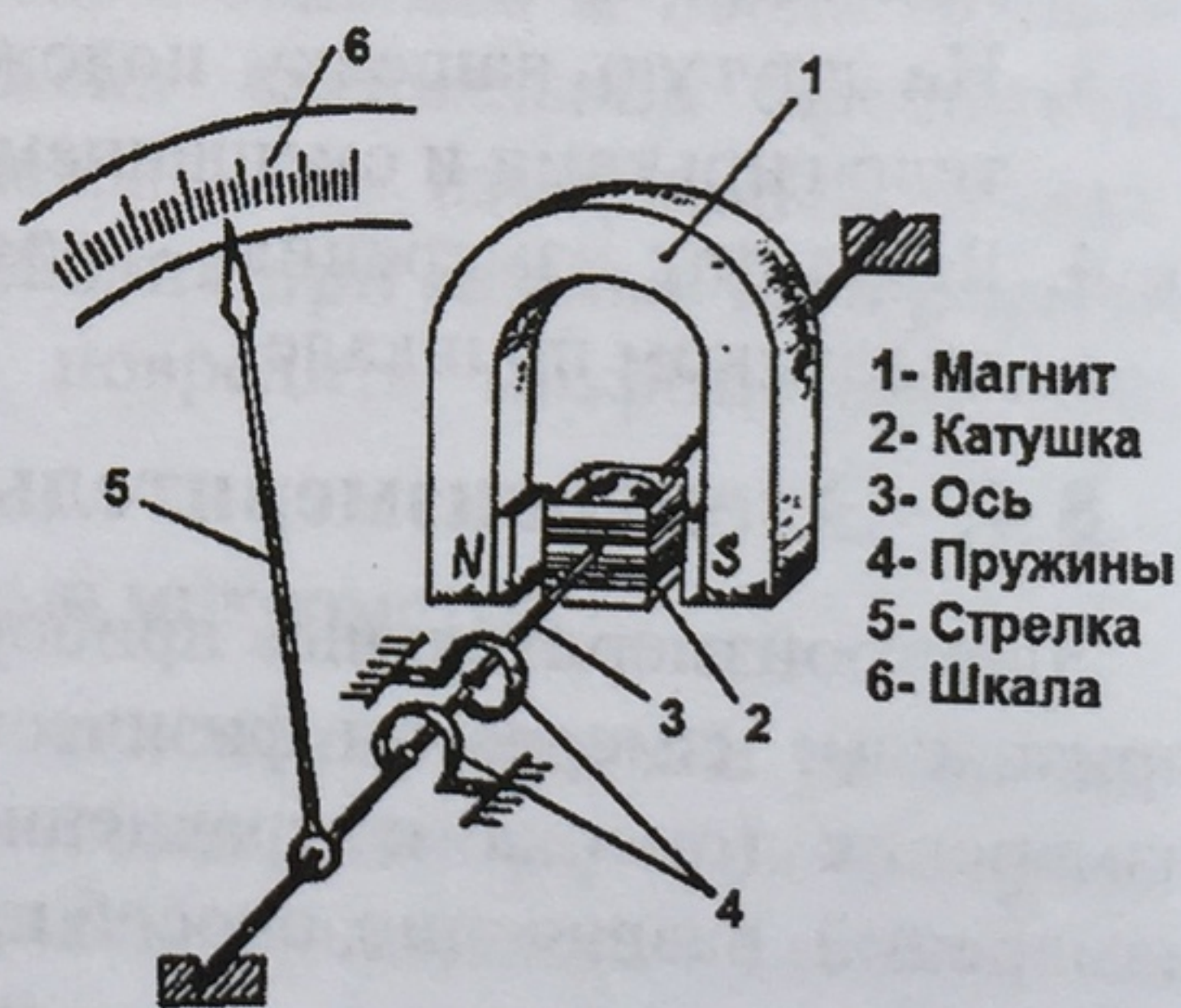
Измеряемая величина	
Сила тока	A
Напряжение	V
Электрическое сопротивление	$\Omega$
Мощность	W

Измеряемый ток	
Постоянный	—
Переменный	~
Постоянный и переменный	—/~

## § 5. Амперметр

Электроизмерительные приборы магнитоэлектрической системы предназначены для измерения силы тока и напряжения в цепях постоянного тока, примером такого прибора является амперметр — прибор для измерения значения силы тока в цепи. Работа приборов магнитоэлектрической системы основана на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита с измеряемым током. Достоинствами магнитоэлектрических приборов являются: высокая чувствительность и точность показаний; равномерность шкалы; нечувствительность к внешним магнитным полям; малое потребление энергии. К недостаткам данной системы относятся возможность измерений только в цепях постоянного тока и чувствительность к перегрузкам (прибор легко перегорает).

В конструкцию стрелочного амперметра входит постоянный магнит, проводящая рамка, жестко соединенная со стрелкой, возвращающая пружина. Благодаря взаимодействию постоянного магнитного поля и тока, текущего через обмотку рамки, возникает сила Ампера. Угол поворота рамки и стрелки устанавливается при равенстве момента силы Ампера  $M_1$  и момента силы упругости  $M_2$ , возникающей в пружине.



- 1- Магнит
- 2- Катушка
- 3- Ось
- 4- Пружина
- 5- Стрелка
- 6- Шкала

Введем обозначения:  $I$  — сила тока в рамке,  $S$  — площадь одного витка,  $N$  — число витков,  $B$  — магнитная индукция поля постоянного магнита. Благодаря конструкции, момент силы Ампера не зависит от положения рамки в зазоре и равен:

$$M_1 = I \cdot S \cdot N \cdot B$$



Момент сил упругости прямо пропорционален углу поворота рамки  $\alpha$ :

$$M_2 = \gamma \alpha$$

Положение равновесия рамки с током достигается, если  $M_1 = M_2$ . При этом условии сила тока, текущего через амперметр, будет пропорциональна углу поворота, следовательно, шкала амперметра является линейной.

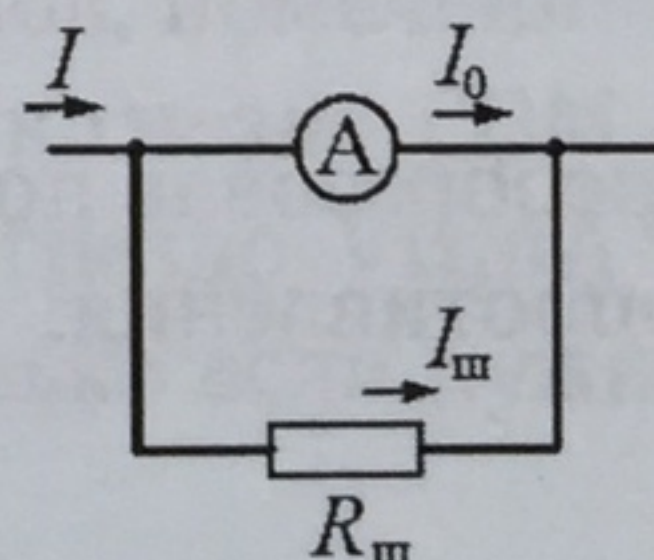
Чтобы устранить влияние силы тяжести на стрелку при повороте, к стрелке прикрепляют противовесы, так что общий центр тяжести находится на оси, вокруг которой поворачивается стрелка. Кроме того, в конструкциях приборов данной системы предусмотрено устройство, обеспечивающее плавный подход рамки к положению равновесия. Как и у любого другого стрелочного прибора, на корпусе амперметра обязательно указывается класс точности.

Как видно из конструкции, амперметр показывает значение силы тока, текущего через сам прибор. При последовательном соединении двух элементов в цепи через них идет одинаковый ток. Это означает, что для измерения силы тока в проводнике амперметр необходимо подключить с ним последовательно. Нужно иметь в виду, что сам амперметр обладает некоторым сопротивлением. Поэтому сопротивление участка цепи с включенным амперметром увеличивается, и при неизменном напряжении сила тока уменьшается в соответствии с законом Ома. Чтобы амперметр не влиял на измеряемый ток, его сопротивление делают очень малым.

Вследствие малого сопротивления амперметра  $r_A$  следует быть очень аккуратным и не пытаться измерить ток, текущий через источник напряжения  $U_0$ , подключая прибор напрямую. В этом случае произойдет короткое замыкание: при малом сопротивлении прибора сила тока достигнет столь больших величин, что обмотка амперметра сгорит. Током короткого замыкания называется величина  $I_{кз} = \frac{U_0}{r_A}$ .

Для расширения пределов измерения амперметра используют шунтирование — подключение параллельно прибору известного сопротивления  $R_{ш}$ . Расчет необходимого значения сопротивления шунта проводят следующим образом.

Допустим, необходимо увеличить предел измерения в  $n$  раз, то есть  $I_0$  — ток, на который рассчитан амперметр сопротивлением  $r_A$ , а в цепи течет ток  $nI_0$ .





При параллельном подключении шунта через него течет ток  $I_{ш}$ , а через амперметр  $I_0$ . Причем, общий ток в цепи  $nI_0 = I_0 + I_{ш}$ . Так как напряжение на амперметре равно напряжению на шунте, можно записать:  $I_{ш}R_{ш} = I_0r_A$ . Преобразовав полученные уравнения, находим значение сопротивления шунта:

$$R_{ш} = \frac{r_A}{n - 1}$$

## § 6. Вольтметр

Еще один распространённый прибор магнитоэлектрической системы — стрелочный вольтметр, прибор для измерения значения напряжения на участке цепи. Конструкция вольтметра практически идентична конструкции амперметра. При протекании через прибор тока  $I$  напряжение на клеммах прибора будет, очевидно, равно  $U = IR_V$ , где  $R_V$  — внутреннее сопротивление прибора. Так что для получения вольтметра необходимо просто произвести соответствующую градуировку шкалы.

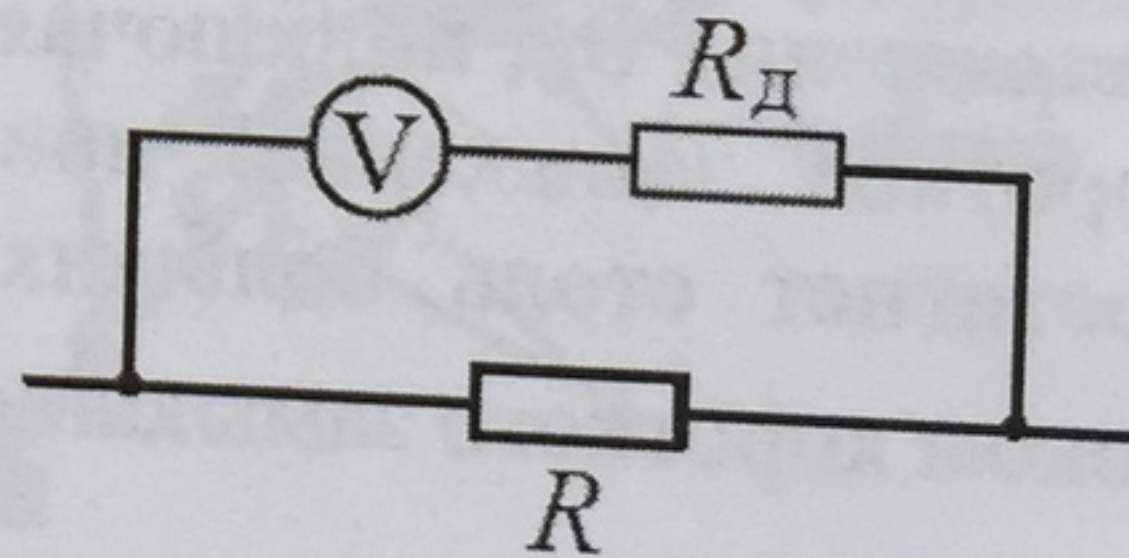
Так как вольтметр показывает напряжение на приборе, исследуемый элемент необходимо подключать параллельно. В этом случае напряжения на элементе будет равно напряжению на приборе. Если сопротивление вольтметра  $R_V$ , то после включения его в цепь сопротивление участка будет уже не  $R$ , а  $\frac{RR_V}{R+R_V} < R$ . Из-за этого измеряемое напряжение на участке цепи уменьшится. Чтобы вольтметр не влиял на измеряемое напряжение, его сопротивление делают очень большим.

Чтобы расширить пределы измерения напряжения в  $n$  раз и измерять напряжения до значений  $U = n \cdot U_0$ , последовательно вольтметру нужно присоединить добавочное сопротивление  $R_d$  (шунт). Тогда падение напряжения на приборе  $U_V$  будет составлять только часть от общего напряжения  $U$ :

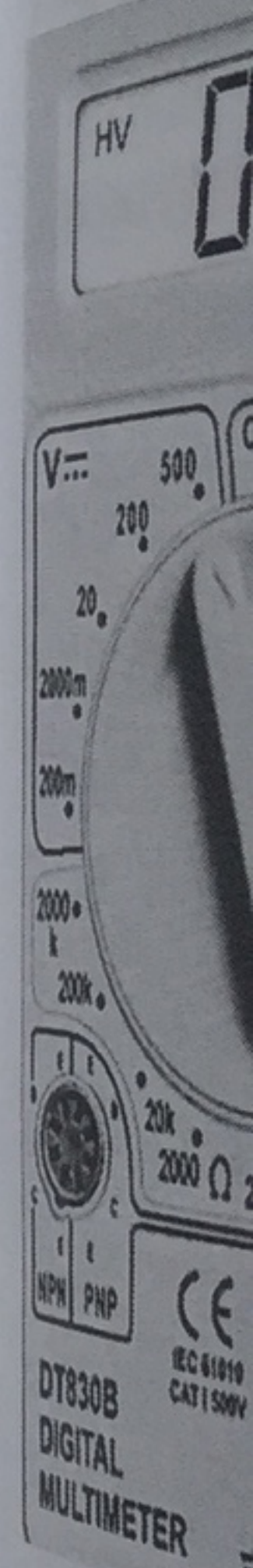
$$U_V = U \frac{R_V}{R_V + R_d}$$

Преобразовав полученные уравнения, находим значение добавочного сопротивления:

$$R_d = (n - 1) R_V$$



§ 7. Мультиметр  
Мульти...  
объединяет  
включает  
дополняет  
транзистор  
Существует  
чаще испо  
Наиболее  
цифрового  
показывает  
с ограничен

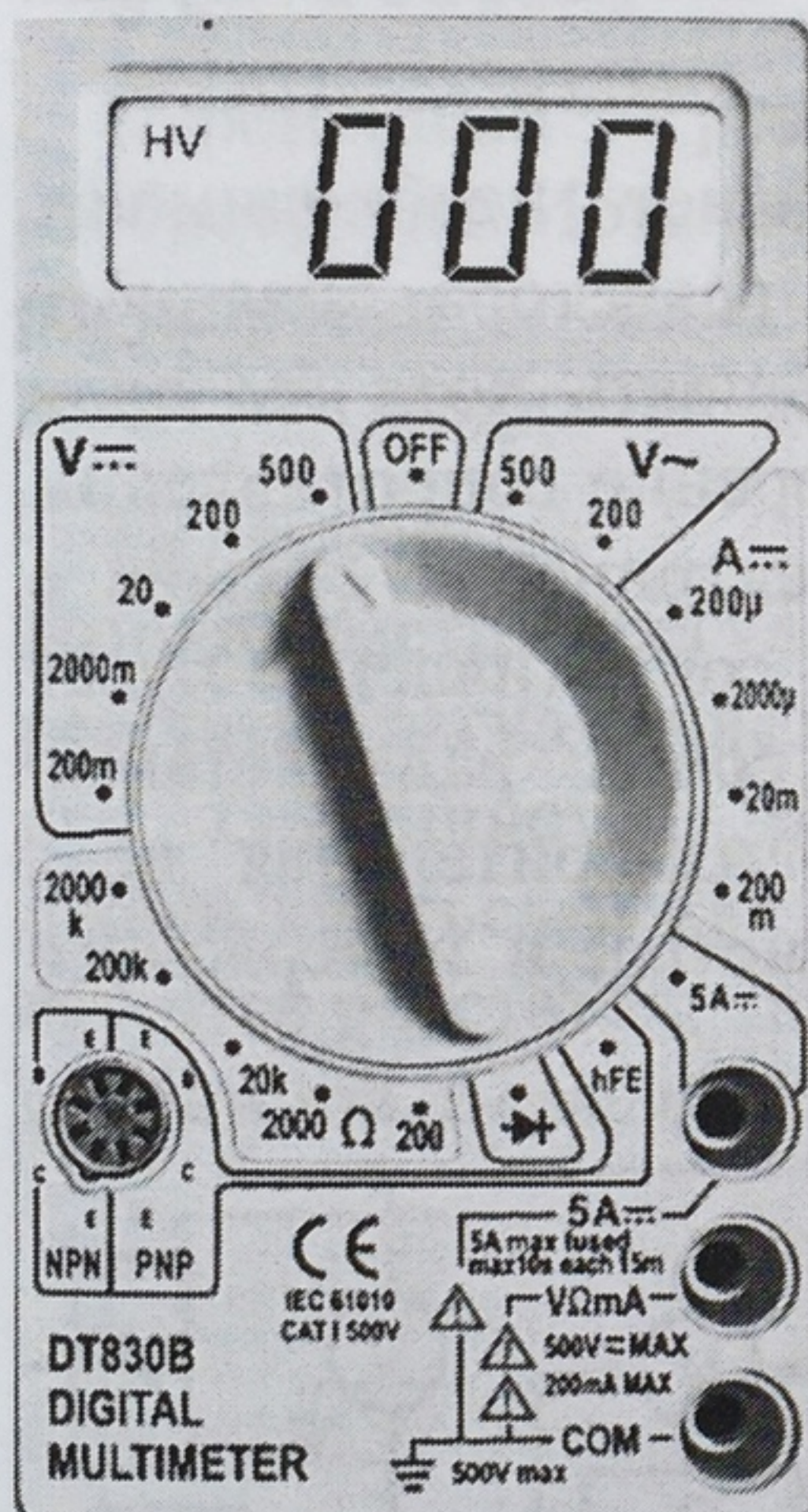


измерения  
1000V. Пре  
20V. Все др  
уменьшится  
К мульт  
щупы. У му  
как 10A, V  
это отрицат  
это положит  
измерять бо



## § 7. Мультиметр

Мультиметр — комбинированный электроизмерительный прибор, объединяющий в себе несколько функций. В минимальном наборе включает функции вольтметра, амперметра и омметра, часто в дополнение есть функции измерения частоты, проверки биполярных транзисторов, измерения температуры и другие. Существуют цифровые и аналоговые мультиметры, но, как правило, чаще используются цифровые ввиду удобства и большей точности. Наиболее распространены приборы с разрядностью 3,5. Разрядность цифрового измерительного прибора «3,5» означает, что дисплей прибора показывает 3 полноценных разряда, с диапазоном от 0 до 9, и 1 разряд — с ограниченным диапазоном.



Мультиметры имеют спереди большую ручку, поворотом которой выбирается режим измерений. Для обозначения постоянной или переменной величины кроме символьных обозначений могут быть использованы буквенные: AC (alternating current) переменный ток; DC (direct current) постоянный ток. Для единиц измерения обычно используют метрические префиксы:  $\mu$  (микро)  $10^{-6}$ ; m (милли)  $10^{-3}$ ; k (кило)  $10^3$ ; M (мега)  $10^6$ .

Режим необходимо выбрать так, чтобы максимальная величина превышала ожидаемое измеряемое значение, но не очень сильно. Предположим, что нужно измерить напряжение батарейки, которое должно быть около 4.5V. На мультиметре есть несколько пределов для измерения постоянного напряжения: 200mV, 2000mV, 20V, 200V, и 1000V. Предел 2000mV слишком мал, так что стоит выбрать следующий: 20V. Все другие диапазоны слишком велики, и если их использовать, то уменьшится точность измерения.

К мультиметру в комплекте прилагаются специальные провода — щупы. У мультиметра есть три отдельных гнезда для щупов, помеченные как 10A, V $\Omega$ mA и COM. Черный щуп всегда включается в гнездо COM — это отрицательный полюс. Красный щуп включается в гнездо V $\Omega$ mA — это положительный полюс. Гнездо 10A используется, только если нужно измерять большие токи (красный щуп).



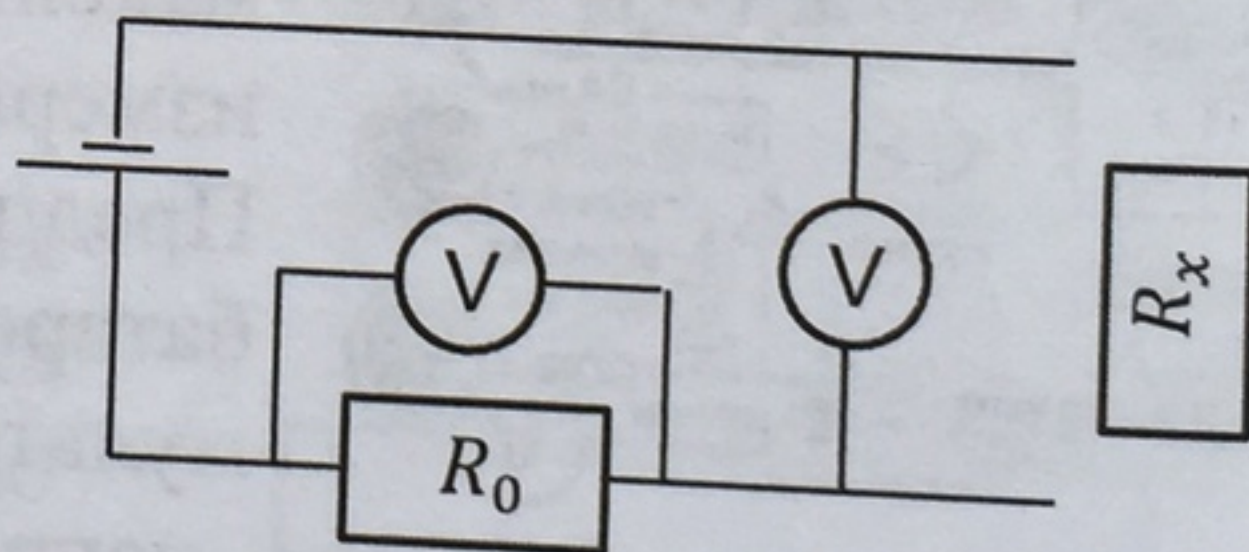
При частом использовании мультиметра в первую очередь страдают измерительные щупы. Часто происходит нарушение контакта щупа и разъёма подключения щупа вследствие механического износа токоведущих жил измерительного щупа. Бывают случаи, что на вид измерительный щуп выглядит исправным, но при проведении измерений показания "скачут", и не соответствуют действительности. Перед проведением измерений следует проверять исправность электрических щупов. Мультиметр переводят в режим измерения наименьшего сопротивления и замыкают щупы накоротко. При этом нужно прощупать вдоль изолированные проводники щупов. Если в медных жилах измерительного щупа есть плохой контакт, то на цифровом дисплее мультиметра показания будут сбиваться. Данная простая проверка щупов перед началом измерений позволит избежать неверных показаний.

При ремонте радиоаппаратуры часто возникает необходимость проверить сопротивление радиодетали, например, резистора, впаянного в электронную схему. В таком случае нужно выпаять хотя бы один вывод радиодетали, и уже затем производить измерение сопротивления. Впаянная в электронную схему радиодеталь электрически связана с другими элементами схемы, и общее измеряемое сопротивление будет равно сопротивлению всех связанных между собой радиодеталей. Необходимо обеспечить условия, при которых измерительная цепь состоит только из измерительного прибора — омметра, и измеряемого сопротивления.

Упрощенная схема омметра показана ниже. Значение неизвестного сопротивления  $R_x$  вычисляется по заданному значению опорного сопротивления  $R_0$  и показаниям двух вольтметров  $U_x$  и  $U_0$ :

$$R_x = R_0 \frac{U_x}{U_0}$$

Если замкнуть щупы накоротко в режиме омметра, мультиметр не покажет ноль! Он покажет сопротивление щупов, которое нужно учитывать при вычислениях. Истинное значение измеряемого сопротивления можно вычислить, вычтя из показаний мультиметра значение сопротивления щупов.



упрощенная схема омметра

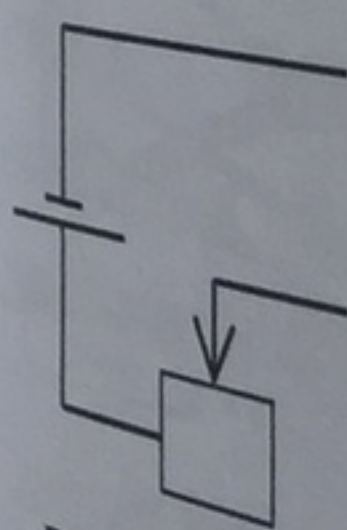
Погрешность инструкции по от считываемых

Не стоит за мультиметра ска батареи прибор Поэтому следует чтобы мультим параметров. Во в дисплее появляе батарею следует

## § 8. Реостаты

Переменный изобретённый Ио регулировки си величины сопротив

Переменные потенциометры (р реостаты (регулят как большинств использоваться качестве реостато синонимов, а сам



последовательное подключение

## § 9. Аналоговые

Осциллограф - форму электриче времени) и измер физической лабор измерительными информации и у



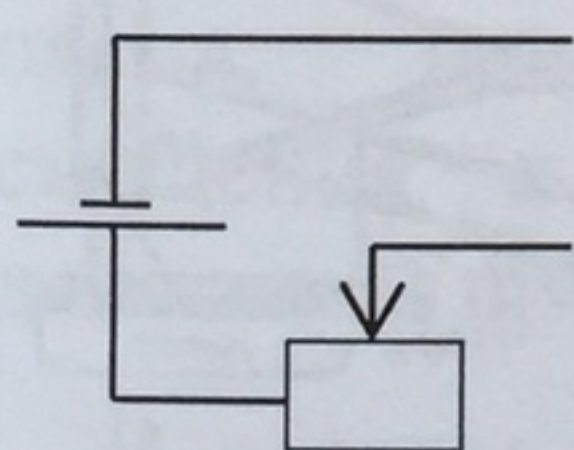
Погрешность измерений мультиметром определяется в соответствии с инструкцией по эксплуатации данной модели по следующей формуле: % от считываемых данных + количество единиц младшего разряда (счета).

Не стоит забывать, что состояние батареи питания цифрового мультиметра сказывается на точности показаний прибора. При разряде батареи прибор начинает выдавать неверные результаты измерений. Поэтому следует заменять разряженную батарею новой, если вы хотите, чтобы мультиметр показывал корректные значения измеряемых параметров. Во всех цифровых приборах при разряде батареи питания на дисплее появляется значок батарейки, сигнализирующий о том, что батарею следует заменить.

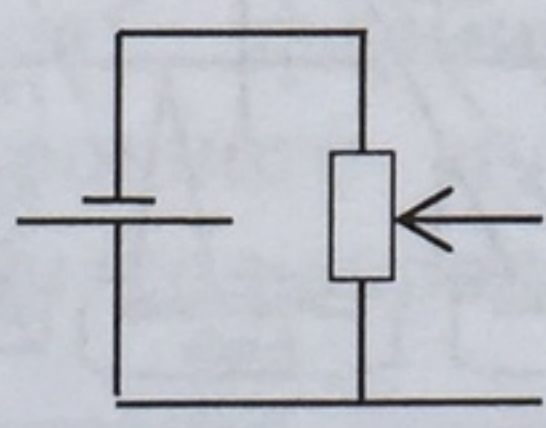
## § 8. Реостат

Переменный резистор — элемент электрической цепи, изобретённый Иоганном Христианом Поггендорфом, служащий для регулировки силы тока и напряжения путём изменения величины сопротивления.

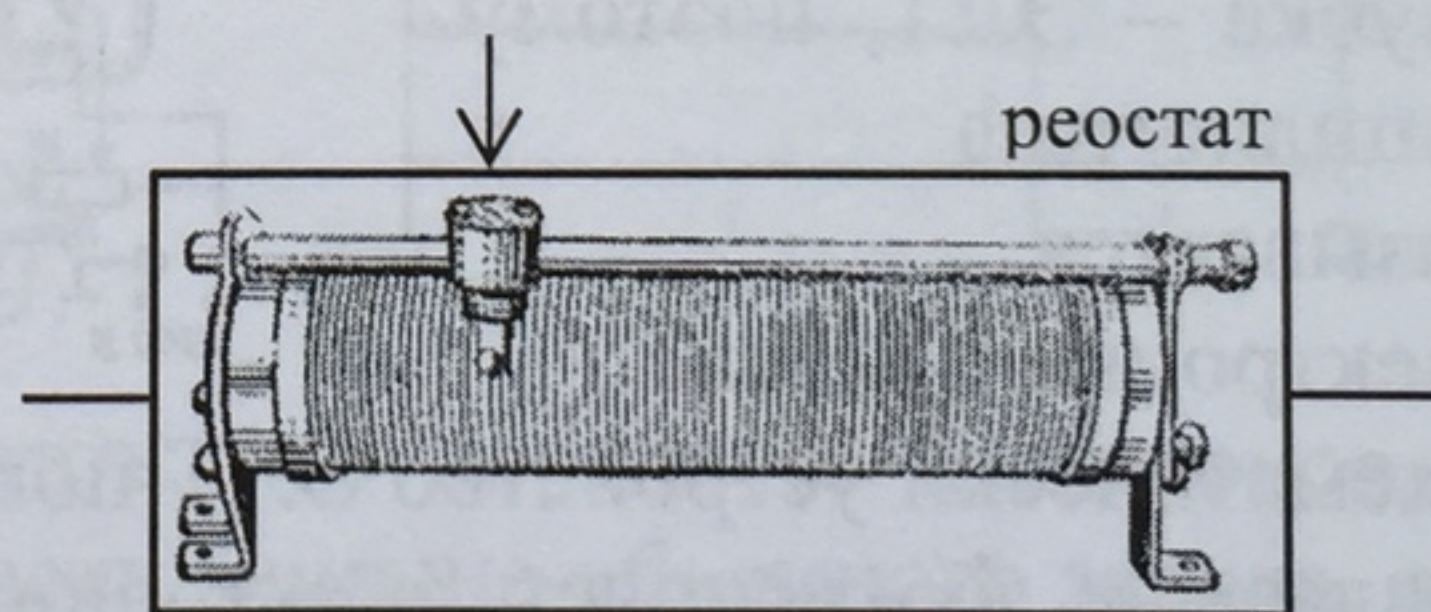
Переменные резисторы принято делить на потенциометры (регуляторы напряжения, параллельное подключение) и реостаты (регуляторы силы тока, последовательное подключение). Так как большинство разновидностей переменных резисторов могут использоваться как в качестве потенциометров, так и в качестве реостатов, названия чаще всего используются в качестве синонимов, а самым общеупотребительным является термин «реостат».



последовательное  
подключение



параллельное  
подключение



## § 9. Аналоговый осциллограф

Осциллограф — это прибор, который позволяет наблюдать на экране форму электрических сигналов (то есть зависимость напряжения от времени) и измерять их параметры. Это — один из основных приборов физической лаборатории. Его преимуществами по сравнению с другими измерительными приборами являются наглядность восприятия информации и универсальность — можно измерять сразу несколько

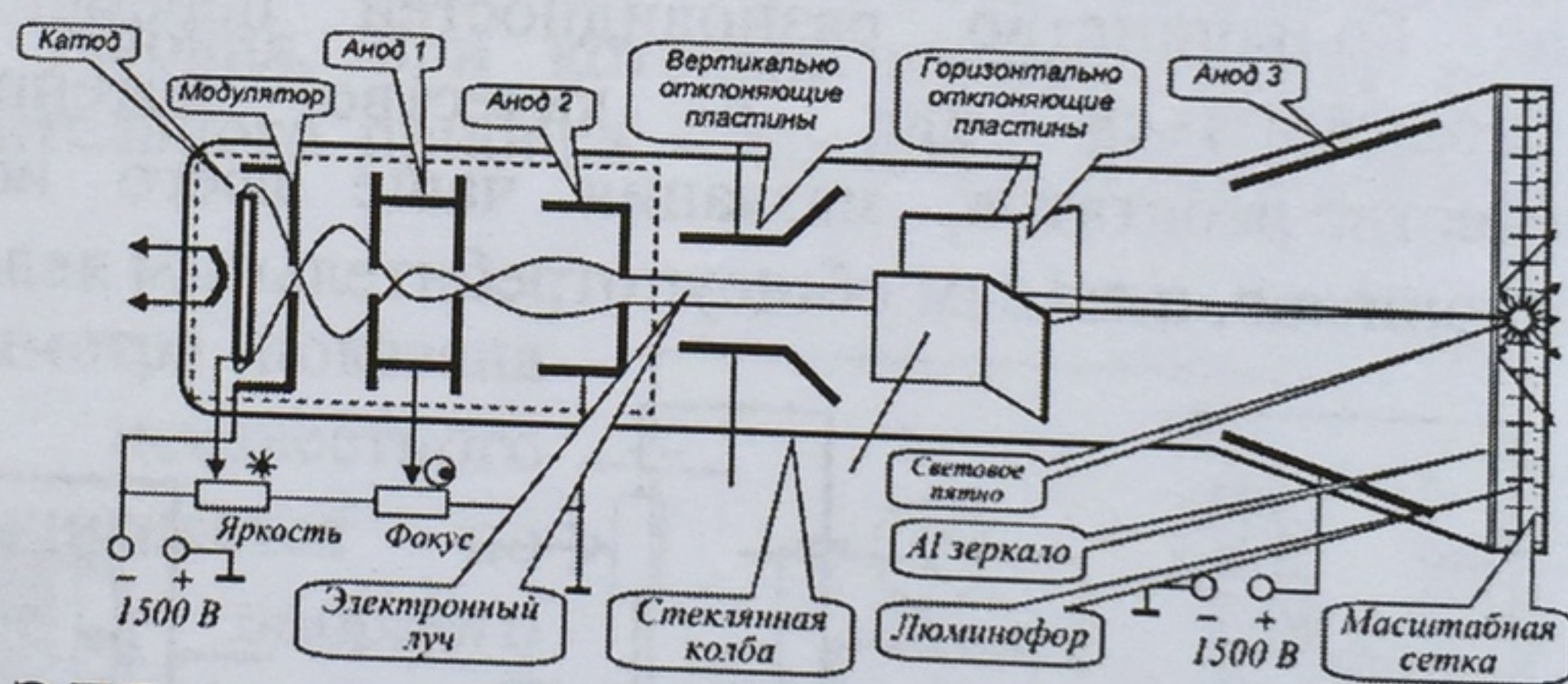


параметров сигнала. К недостаткам можно отнести небольшую точность (до 2-5%) и относительно большую трудоемкость измерений. С помощью осциллографа можно измерять все параметры любых сигналов, в то время как более точные специализированные приборы измеряют обычно какой-то один параметр (например, напряжение, частоту и др.) и, главное, рассчитаны только на сигнал определенной формы (наиболее распространены приборы для измерения параметров гармонических сигналов). Поэтому они могут давать большие и неконтролируемые погрешности при отклонении сигнала от "стандартного" вида.

По назначению и принципу действия осциллографы разделяются на аналоговые, цифровые, запоминающие, стробоскопические, скоростные и специальные. В последнее время все шире используются цифровые осциллографы, а также измерительные приборы, выполненные в формате стандартных плат расширения персональных компьютеров или сопряженные с компьютером по шине USB. которые могут работать как осциллограф с выдачей осциллограммы на монитор. Большим удобством таких устройств является их полная интеграция с компьютером, что облегчает регистрацию результатов и их дальнейшую обработку в реальном времени.

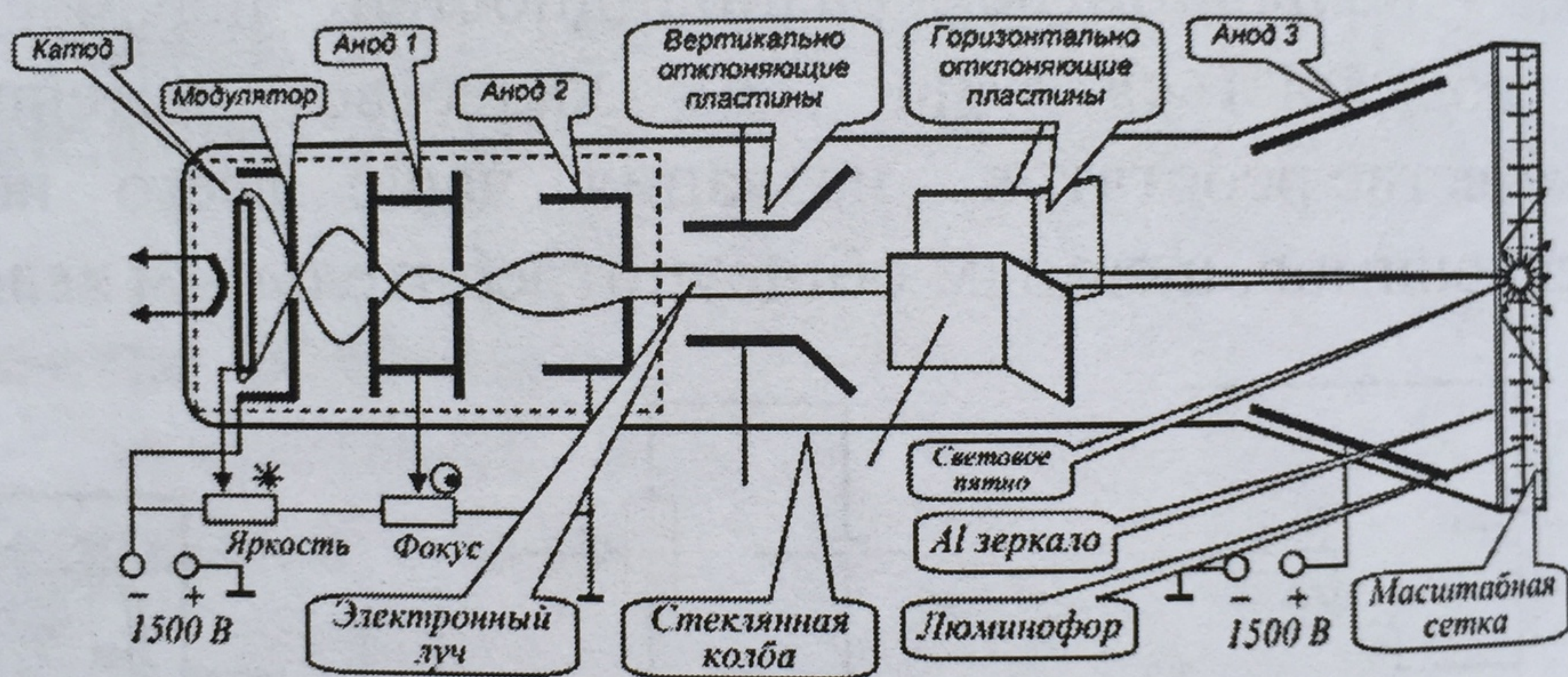
Главным узлом любого аналогового осциллографа является электронно-лучевая трубка – ЭЛТ, поэтому осциллограф и называется электроннолучевым.

Схематически устройство ЭЛТ показано на рисунке. Электронная пушка создает и фокусирует электронный луч. Электроны испускаются из катода, подогреваемого до температуры, достаточной для начала термоэлектронной эмиссии, и затем ускоряются в электрическом поле между катодом и вторым анодом. Далее, до экрана, они пролетают в области почти постоянного потенциала (равного потенциалу второго анода  $U_{a2}$ ). Потенциал создается токопроводящим слоем, нанесенным на стенки трубки. Соударяясь с флюоресцирующим слоем на внутренней поверхности экрана - люминофором, электроны вызывают его свечение.





принципу действия, запоминающие, стробоскопические, скоростные. В последнее время все шире используются цифровые также измерительные приборы, выполненные в плат расширения персональных компьютеров или ютером по шине USB. которые могут работать как ей осциллограммы на монитор. Большим удобством является их полная интеграция с компьютером, что ю результатов и их дальнейшую обработку в

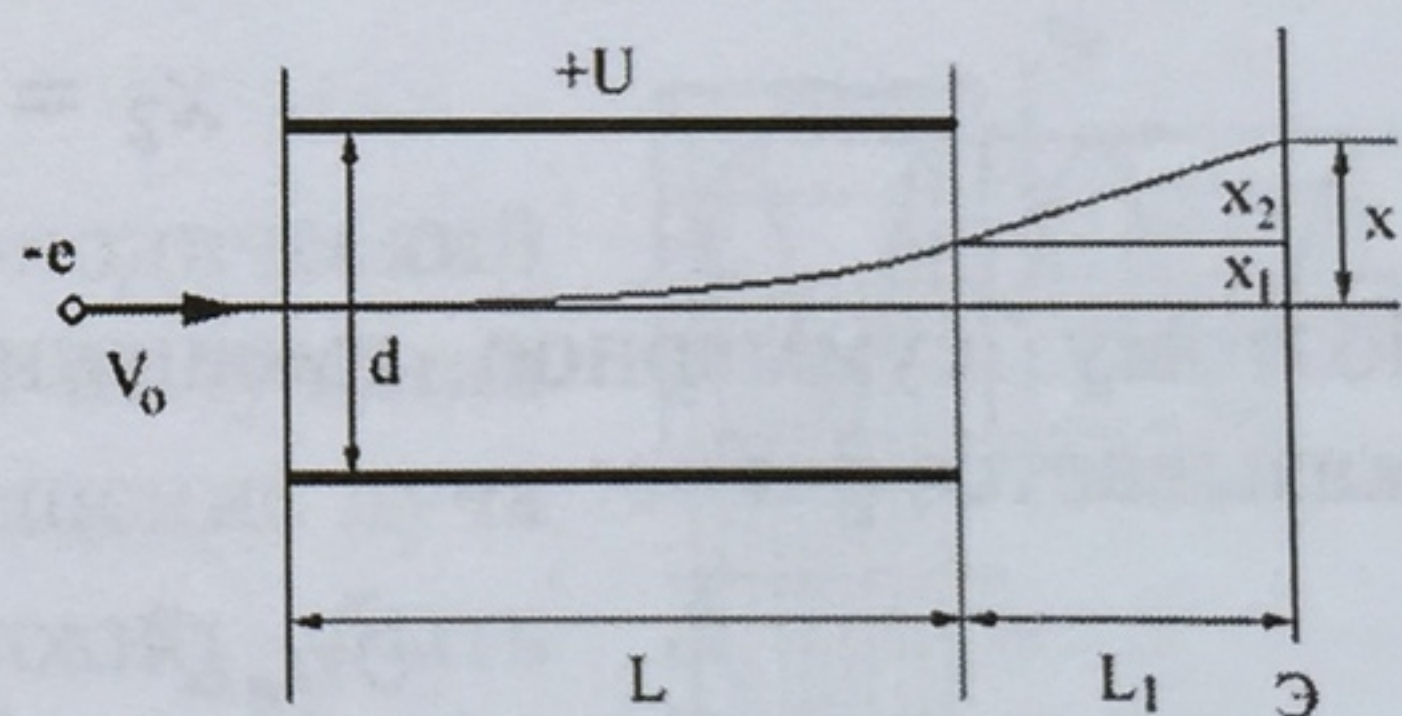


ство ЭЛТ показано на рисунке. Электронная пушка ет электронный луч. Электроны испускаются из ого до температуры, достаточной для начала миссии, и затем ускоряются в электрическом поле орым анодом. Далее, до экрана, они пролетают в оянного потенциала (равного потенциалу второго ал создается токопроводящим слоем, нанесенным на аряясь с флюоресцирующим слоем на внутренней люминофором, электроны вызывают его свечение.



Яркость свечения определяется количеством энергии в единицу времени, сообщенной электронами люминофору (то есть кинетической энергией электронов и их плотностью в электронном луче). С экрана электроны "стекают" на положительный полюс источника питания. Люминофор не токопроводен, и электроны покидают экран либо за счет вторичной эмиссии, то есть выбивания электронов из люминофора падающими на него электронами, либо на экран наносится тонкий токопроводящий слой (обычно из алюминия), прозрачный для быстрых электронов, соединяемый с положительным полюсом источника питания. Катод помещен внутрь цилиндра с отверстием - это управляющий электрод, на него подается отрицательный (по отношению к катоду) потенциал. Изменяя его величину, можно регулировать число электронов в пучке, а значит, яркость свечения пятна на экране. Фокусировка луча осуществляется анодами. Процесс подобен фокусировке световых лучей оптическими линзами, только линзы здесь образованы электростатическими полями между анодами. Регулируя напряжение на первом аноде, можно изменять электростатическое поле (фокусное расстояние линзы) и фокусировать электронный луч.

Положение светового пятна на экране зависит от пары напряжений, приложенных к горизонтально - (X) и вертикально - (Y) отклоняющим пластинам. Принципиально важно, что отклонение электронного луча на экране прямо пропорционально напряжению, приложенному к соответствующей паре отклоняющих пластин. На рисунке представлена схема, поясняющая формирование смещения  $x$  электронного луча под действием приложенного напряжения  $U$ .



В первом приближении будем считать, что плотность электронов в пучке невелика, и не будем рассматривать влияние объемного заряда, то есть влияние движущихся электронов пучка друг на друга. Будем также считать, что поле не выходит за пределы пластин и является однородным (размеры пластин обычно существенно превышают расстояние между ними). Рассчитаем отклонение электрона, имевшего начальную скорость  $V_0$  и движущегося параллельно отклоняющим пластинам, на экране электронно-лучевой трубки. По горизонтали электрон движется с постоянной скоростью  $V_0$ , так как внешние силы по этому направлению на него не действуют. Таким образом, электрон пролетает расстояния  $L$  и  $L_1$  соответственно за интервалы времени  $t = L/V_0$  и  $t_1 = L_1/V_0$ .



В течение времени  $t$  на электрон по вертикали действует сила со стороны электрического поля:

$$F = Eq_e = \frac{U}{d} q_e$$

Электрон движется с ускорением:

$$a = \frac{F}{m_e} = \frac{Uq_e}{dm_e}$$

За время  $t$  электрон приобретает скорость по вертикали:

$$V_x = at = \frac{Uq_e L}{dm_e V_0}$$

За время  $t$  электрон смещается вдоль экрана на расстояние:

$$x_1 = \frac{at^2}{2} = \frac{Uq_e L^2}{2dm_e V_0^2}$$

Далее электрон движется равномерно и прямолинейно в пространстве, свободном от электростатического поля, с компонентами скорости  $V_0$  по горизонтали и  $V_x$  по вертикали. За время пролета до экрана  $t_1$  электрон смещается вдоль экрана на расстояние:

$$x_2 = V_x t_1 = \frac{Uq_e L L_1}{dm_e V_0^2}$$

Поэтому суммарное смещение электронного луча вдоль экрана  $x$  оказывается равно:

$$x = x_1 + x_2 = \frac{Uq_e L^2}{2dm_e V_0^2} + \frac{Uq_e L L_1}{dm_e V_0^2} = \frac{Uq_e L}{2dm_e V_0^2} (L + 2L_1) \sim U$$

Таким образом, отклонение электронного луча на экране  $x$  оказывается пропорционально напряжению  $U$ , поданному на отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки.

Если на Y-пластины подать переменное, например, синусоидальное, напряжение, то электронный луч начнет колебаться в вертикальном направлении. При достаточно большой частоте колебаний (20-50 Гц) движение луча на экране трубки будет восприниматься глазом как светящаяся непрерывная вертикальная линия. Аналогично, напряжение, поданное на горизонтально отклоняющие пластины - X, даст горизонтальную линию. При одновременном воздействии переменных

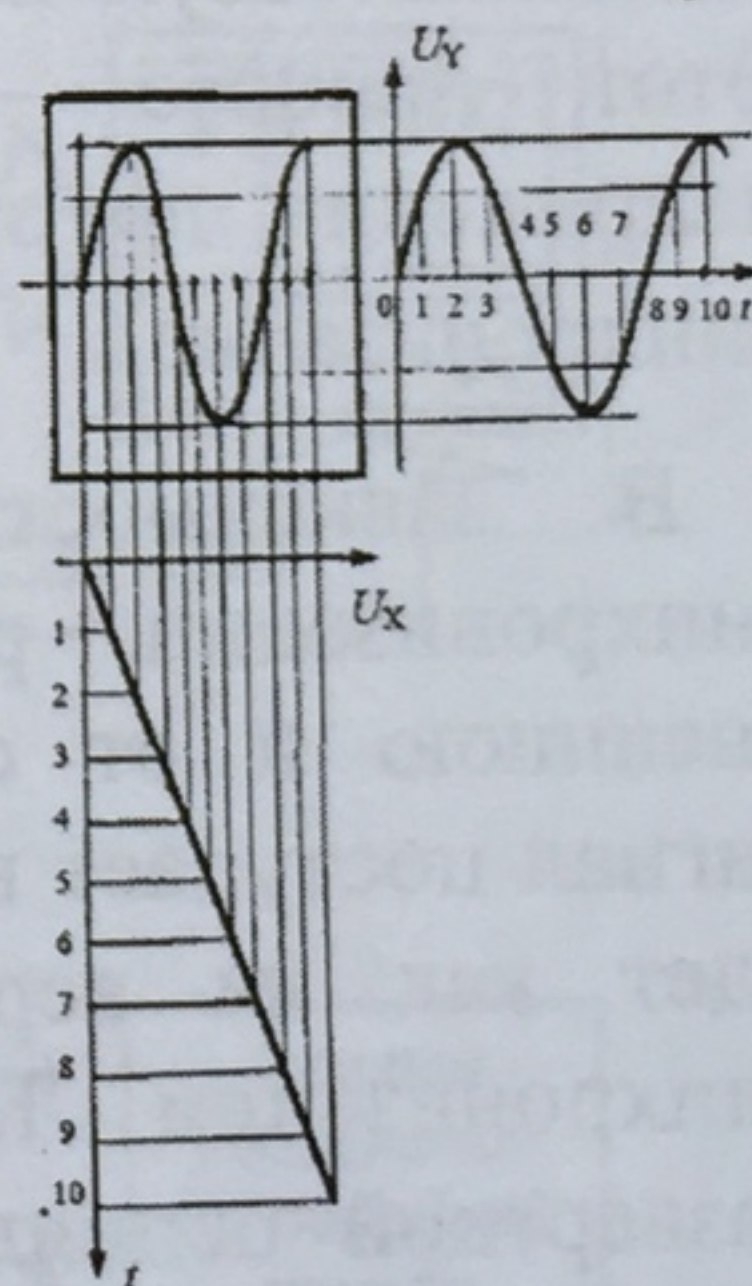


напряжений на обе пары пластин можно получить различные осциллограммы. Например, подавая на пластины X и Y два синусоидальных сигнала с определенными соотношениями частот и фаз, можно наблюдать разные неподвижные замкнутые кривые — фигуры Лиссажу. Если не соблюдается строгое соответствие частот, фигура Лиссажу не будет неподвижной, и по скорости ее эволюции можно оценить расстройку частот.

Подадим на отклоняющие пластины напряжения с близкими частотами  $U_x = U_0 \sin \omega t$  и  $U_y = U_0 \sin(\omega + \delta\omega)t$ , где расстройка частоты  $\delta\omega$  мала ( $0 < \delta\omega \ll \omega$ ). Так как  $\delta\omega$  мала, величину  $\varphi(t) = \delta\omega \cdot t$  можно рассматривать как медленно возрастающий фазовый сдвиг, который остается почти неизменным за время однократного прохождения лучом всей фигуры  $T = 2\pi/\omega$ . Вначале  $\varphi(0) = 0$  и на экране будет наблюдаться отрезок прямой. При  $0 < \delta\omega \cdot t < \pi/4$  на экране будет наблюдаться эллипс, луч будет проходить его по часовой стрелке (это будет заметно при не слишком высокой круговой частоте  $\omega$ ). При  $\delta\omega \cdot t = \pi/2$  на экране будет наблюдаться окружность, причем луч будет проходить ее также по часовой стрелке, при  $\delta\omega \cdot t = \pi$  будет наблюдаться отрезок прямой с наклоном в другую сторону и т.д. Вся эволюция этой фигуры займет время  $\tau = 2\pi/\delta\omega$ . Измерив время  $\tau$ , можно с высокой точностью определить разность близких частот двух колебаний  $\delta\omega$ .

Если нужно наблюдать какой-либо периодический сигнал в зависимости от времени, то для получения его действительной формы  $U_y = f(t)$  смещение луча по оси X (и напряжение  $U_x$ ) должно быть пропорционально времени: за время  $0 < t < 10$  точка один раз "пробежала" по синусоиде по экрану — получили однократную осциллограмму. Существуют запоминающие осциллографы — способные фиксировать однократную осциллограмму.

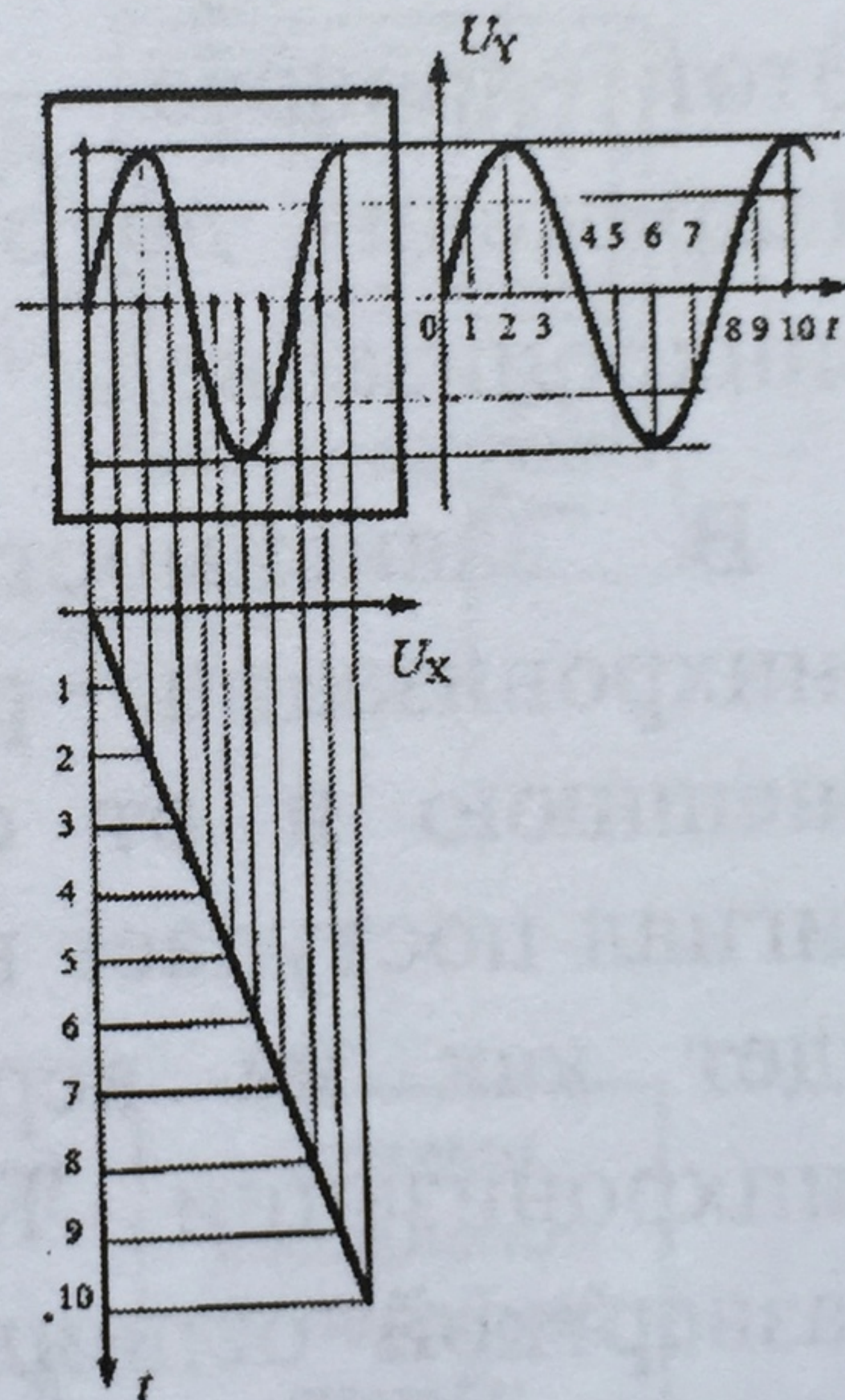
В обычных осциллографах для того, чтобы получить неподвижную картину, а не бегущую точку, необходимо, чтобы однократная осциллограмма не менее 10-50 раз в секунду повторялась (это связано с временем послесвечения люминофора и временем релаксации глаза) — и каждый раз приходилась бы на одни и те же точки экрана. Для этого нужно следующее.





ок прямой. При  $0 < \delta\omega \cdot t < \pi/4$  на  
 , луч будет проходить его по часовой  
 е слишком высокой круговой частоте  
 будет наблюдаться окружность, причем  
 часовой стрелке, при  $\delta\omega \cdot t = \pi$  будет  
 наклоном в другую сторону и т.д. Вся  
 время  $\tau = 2\pi/\delta\omega$ . Измерив время  $\tau$ ,  
 разделить разность близких частот двух

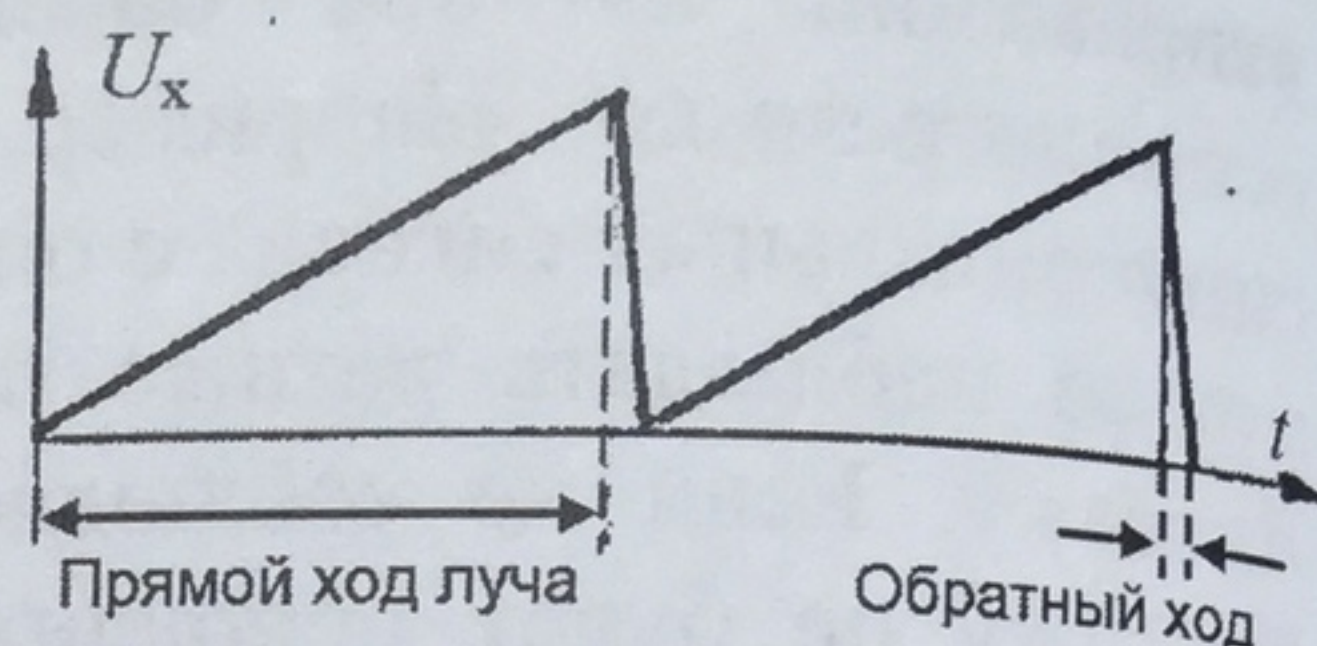
либо периодический  
 , то для получения  
 $f(t)$  смещение луча  
 $U_x$ ) должно быть  
 время  $0 < t < 10$   
 нусоиде по экрану —  
 грамму. Существуют  
 — способные  
 логограмму.



для того, чтобы получить неподвижную  
 нку, необходимо, чтобы однократная  
 раз в секунду повторялась (это связано с  
 офора и временем релаксации глаза) - и  
 одни и те же точки экрана. Для этого

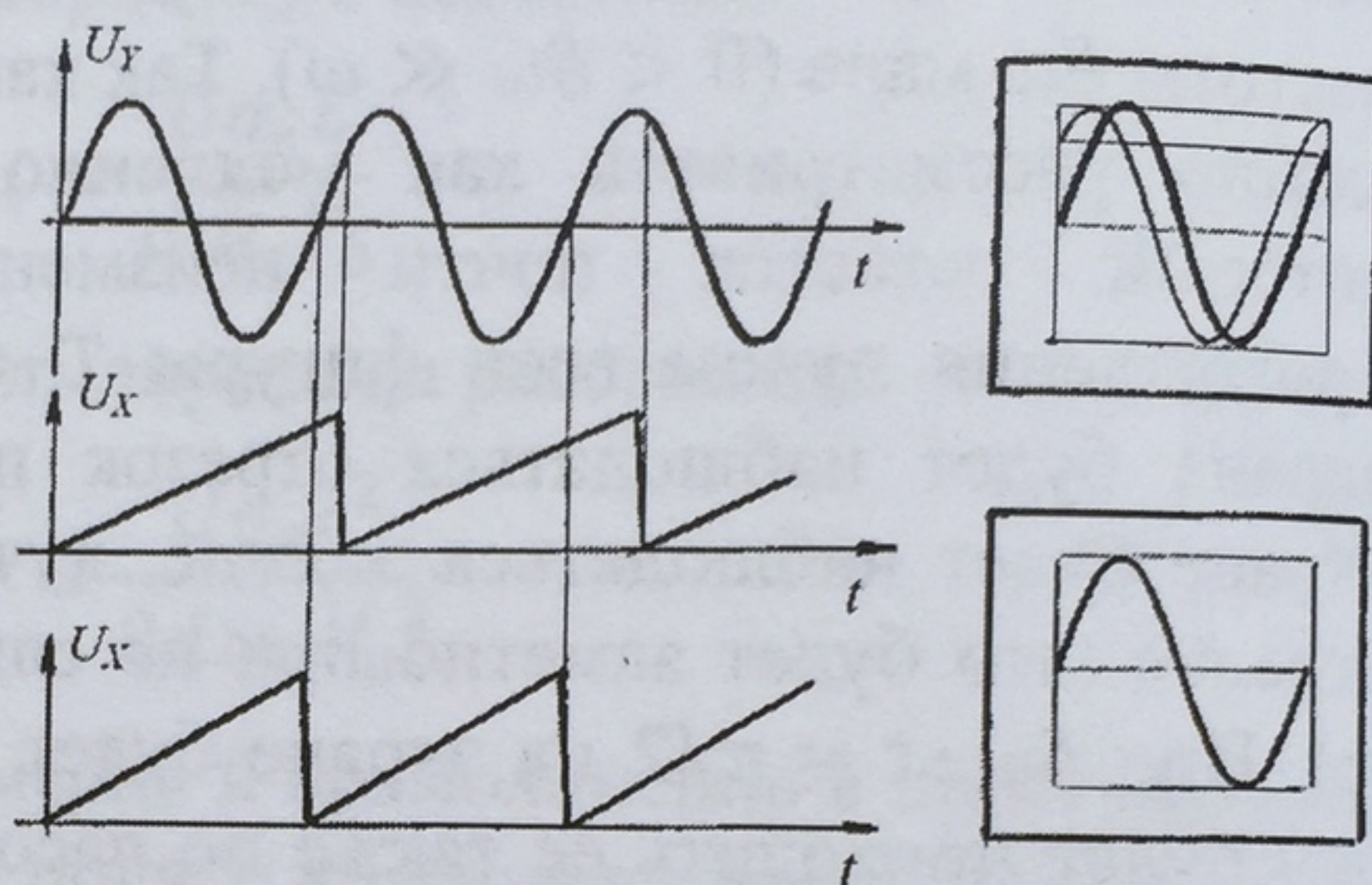


- Что бы линейно возрастающее напряжение периодически повторялось — такое напряжение называется пилообразным и вырабатывается специальным генератором, который встроен в осциллограф.



- Чтобы периоды пилообразного напряжения и исследуемого сигнала были равны или точно кратны друг другу.

Добиться кратности периодов ручной установкой практически невозможно из-за неизбежной нестабильности как периода развертки, так и периода сигнала. Кроме того, при ручном изменении периода развертки нарушается временной масштаб и становится невозможным измерение интервалов времени



непосредственно по экрану методом калиброванной развертки. Поэтому в осциллографе имеется блок синхронизации, выполняющий автоматическую подстройку периода развертки без изменения масштаба. Этот процесс — изменение периода повторения пилообразного напряжения до значения, кратного периоду сигнала  $U_y$ , называется синхронизацией.

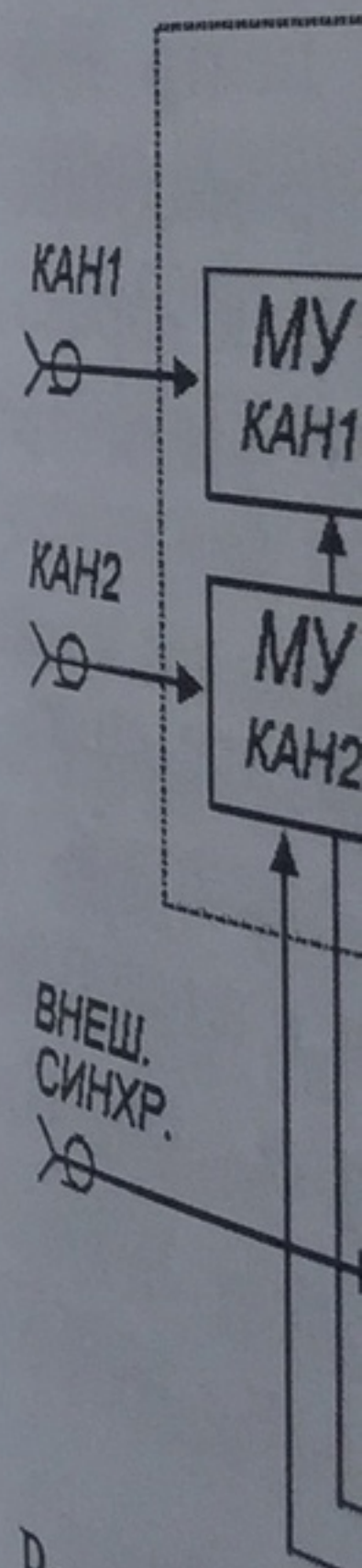
В зависимости от того, какой сигнал управляет схемой синхронизации, различают три вида синхронизации: внутреннюю, внешнюю и от сети. При внутренней синхронизации исследуемый сигнал поступает на вход "Y" и уже внутри осциллографа разделяется и идет как на вертикально отклоняющие пластины, так и в блок синхронизации. Таким образом, исследуемый сигнал сам управляет разверткой осциллографа. При внешней синхронизации исследуемый сигнал с входа "Y" идет только на пластины вертикального отклонения, а в блок синхронизации сигнал пойдет с входа "X" — его нужно специально подать. Использовать внешнюю синхронизацию целесообразно в случае, если исследуемый сигнал недостаточен по амплитуде или непригоден по форме для синхронизации (например, содержит шумы). Внешняя синхронизация также обычно применяется при изучении импульсных устройств, все цепи которых работают синхронно от одного тактового

генератора. Сигналы от узлов приборной сети (т.д.). В этом промышленной сигнал подается

## § 10. Цифровые

Цифровые запоминающие люминофором стробоскопический

Цифровой распространенный. Рассмотрим кратность показана преобразование двухканального которой можно вертикального сигнала систему синхронизации



Рассмотрим входного разъем. Поступает на мультиплексор в цифровой преобразователь сигнал подается

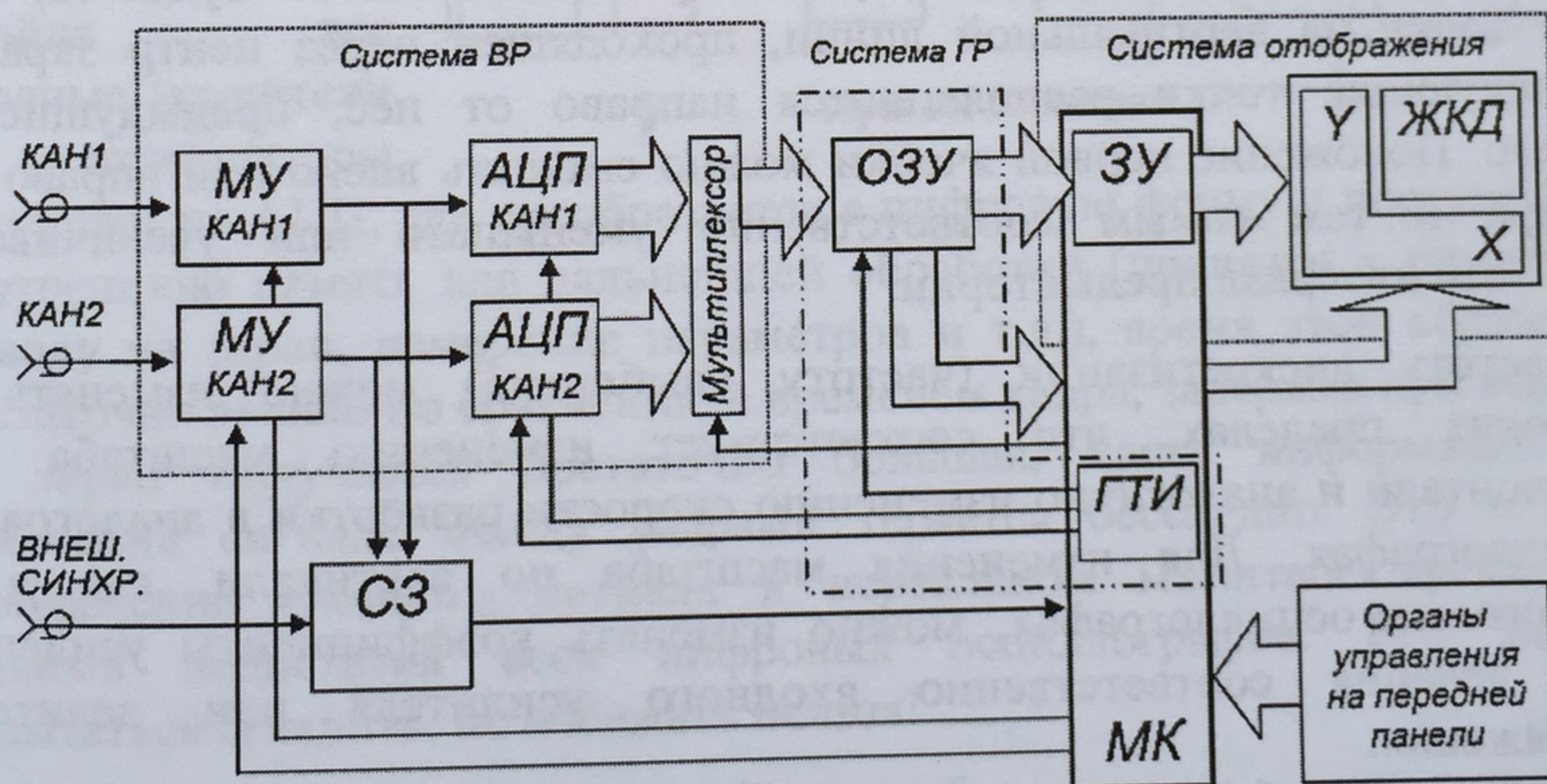


генератора. Синхронизация от сети обычно используется для проверки узлов приборов, связанных с преобразованием питающего напряжения от силовой сети (трансформаторов, выпрямителей, стабилизаторов и т.д.). В этом режиме в блок синхронизации попадает сигнал от промышленной сети 50 Гц (на вход "X" ничего подавать не надо, этот сигнал подается внутри осциллографа).

## § 10. Цифровой осциллограф

Цифровые осциллографы подразделяются на цифровые запоминающие осциллографы (ЦЗО), осциллографы с цифровым люминофором (фосфором), осциллографы смешанных сигналов, стробоскопические, виртуальные и портативные осциллографы.

Цифровой запоминающий осциллограф является наиболее распространенным в лабораторной практике осциллографом. Рассмотрим кратко его устройство и принцип действия. На рисунке показана предельно упрощенная типовая структурная схема двухканального цифрового запоминающего осциллографа, в составе которой можно выделить четыре базовых системы — систему вертикального формирования, систему горизонтального формирования, систему синхронизации (запуска) и систему отображения.



Рассмотрим кратко работу осциллографа в одноканальном режиме. С входного разъема одного из каналов СВО входной аналоговый сигнал поступает на масштабирующее устройство (МУ), которое приводит его амплитуду в соответствие с динамическим диапазоном аналого-цифрового преобразователя (АЦП). С масштабирующего устройства сигнал подается на входы АЦП и системы запуска (СЗ).



Частота выборок АЦП, а, следовательно, масштаб времени по оси «Х», задается генератором тактовых импульсов (ГТИ), который входит в состав микроконтроллера (МК). С выхода АЦП последовательность кодовых слов поступает в ОЗУ, где образуется постоянно обновляемый массив цифровых данных входного сигнала. Значение двоичного числа, записанного в конкретную ячейку памяти, определяет координату «Y», а номер ячейки  $N_i$  определяет координату «X» точки, отображаемой на экране.

При выполнении условия запуска, СЗ вырабатывает импульс запуска, по которому МК переписывает массив данных из ОЗУ во внутреннее запоминающее устройство (ЗУ), входящее в систему отображения, где и формируется массив осциллограммы. По команде МК массив осциллограммы с ЗУ поступает в систему управления дисплеем, и, далее, выводится на экран. Микроконтроллер выводит на экран также и всю сопровождающую информацию.

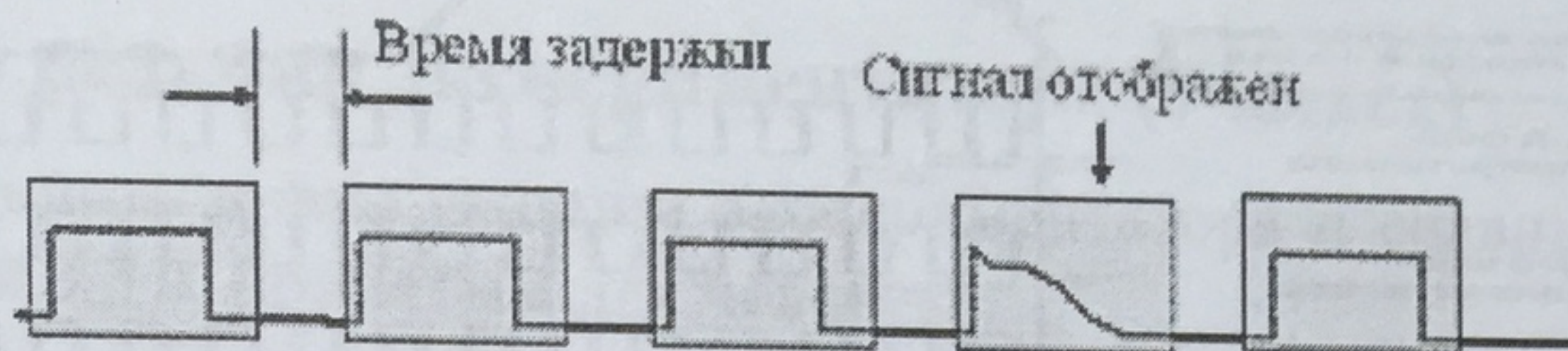
Ещё одно принципиальное отличие от аналоговых осциллографов состоит в том, что на цифровом осциллографе можно видеть предысторию сигнала до появления импульса запуска. Это называют «предзапуском». Кодовые слова переписываются из ОЗУ в ЗУ так, что в момент появления импульса запуска первой ячейкой ЗУ будет та, что даёт точку на вертикальной линии, проходящей через центр экрана, последующие точки располагаются направо от неё, предыдущие — налево. Положение первой ячейки можно смещать влево или вправо от центра и тем самым соответственно уменьшать или увеличивать видимый интервал предыстории.

Частоту дискретизации (частоту «выборок») можно изменять в широких пределах, что соответствует изменению масштаба по горизонтали и аналогично изменению скорости развёртки в аналоговых осциллографах. Для изменения масштаба по вертикали, как и в аналоговых осциллографах, можно изменять коэффициенты усиления или деления соответственно входного усилителя или делителя напряжения.

В целом цифровой осциллограф имеет больше сходства с компьютером, чем с аналоговым осциллографом. Он позволяет выполнять различные математические операции: растягивать во времени фрагменты записанного в память сигнала, складывать и вычитать сигналы в разных каналах, определять частотный спектр сигнала путём применения быстрого преобразования Фурье и проч.

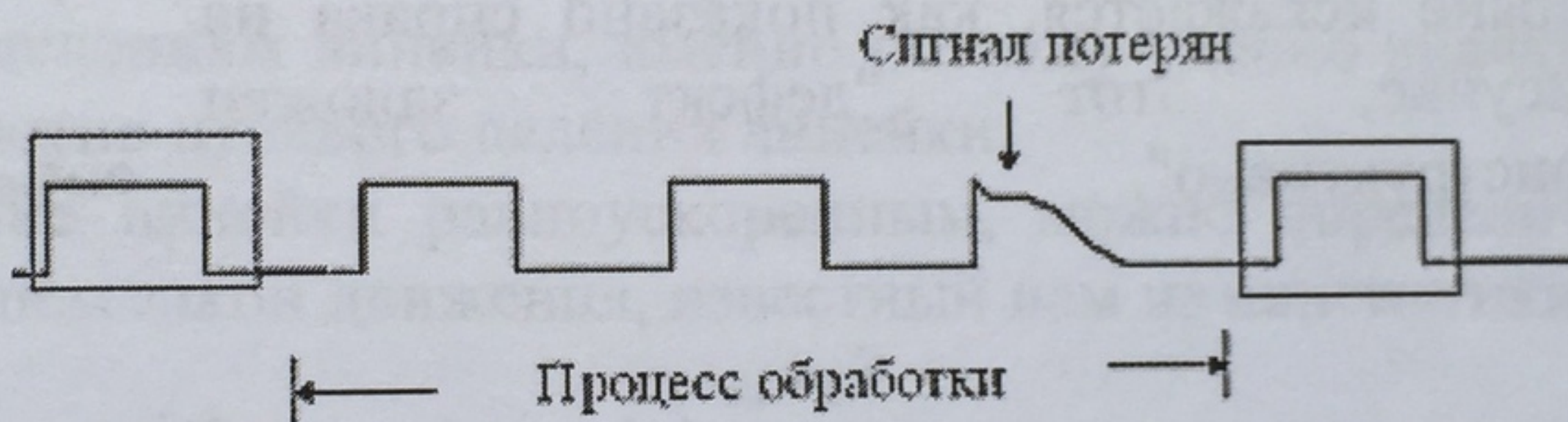


Основным недостатком всех цифровых осциллографов является, то, что они работают не в реальном масштабе времени. На рисунке приведена схема



отображения сигнала аналоговым осциллографом, цветное поле обозначает область, отображаемую на экране (кадр). Задержка между кадрами составляет время обратного хода луча и регулируемое временную задержку запуска развертки для получения стабильной синхронизации. Это время достаточно мало по сравнению с временем развертки и поэтому если сигнал от кадра к кадру изменяется, это изменение немедленно отображается на экране, это и есть отображение сигнала в реальном времени. Динамика сигнала, как по вертикали, так и по горизонтали соответствует изменениям входного сигнала.

Цифровой осциллограф использует абсолютно другой принцип работы. Входной сигнал, в размере выбранного кадра, пройдя все входные усилители и аттенюаторы

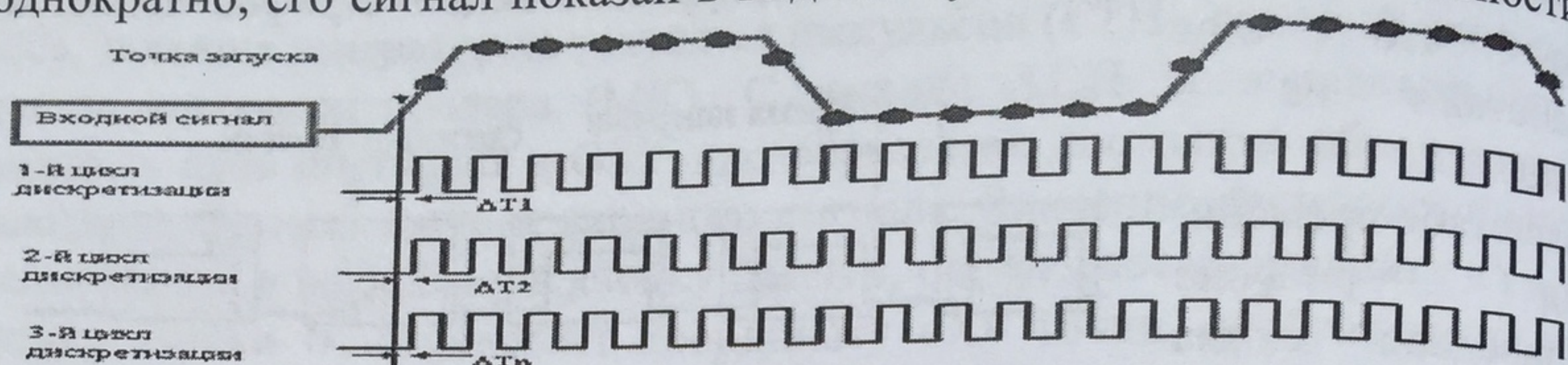


поступает на АЦП, где преобразуется в цифровую форму и поступает во внутреннюю память для дальнейшей обработки (привязки к развертке, выводу на экран, измерение параметров и т.д.), время этой обработки достаточно велико по сравнению с временем кадра, задержка при выводе на экран получается достаточно большая, часть информации об изменении сигнала между кадрами теряется бесследно. Это и есть отображение входного сигнала в нереальном масштабе времени - главный недостаток всех цифровых осциллографов. Его можно попытаться сгладить, но избежать нельзя!

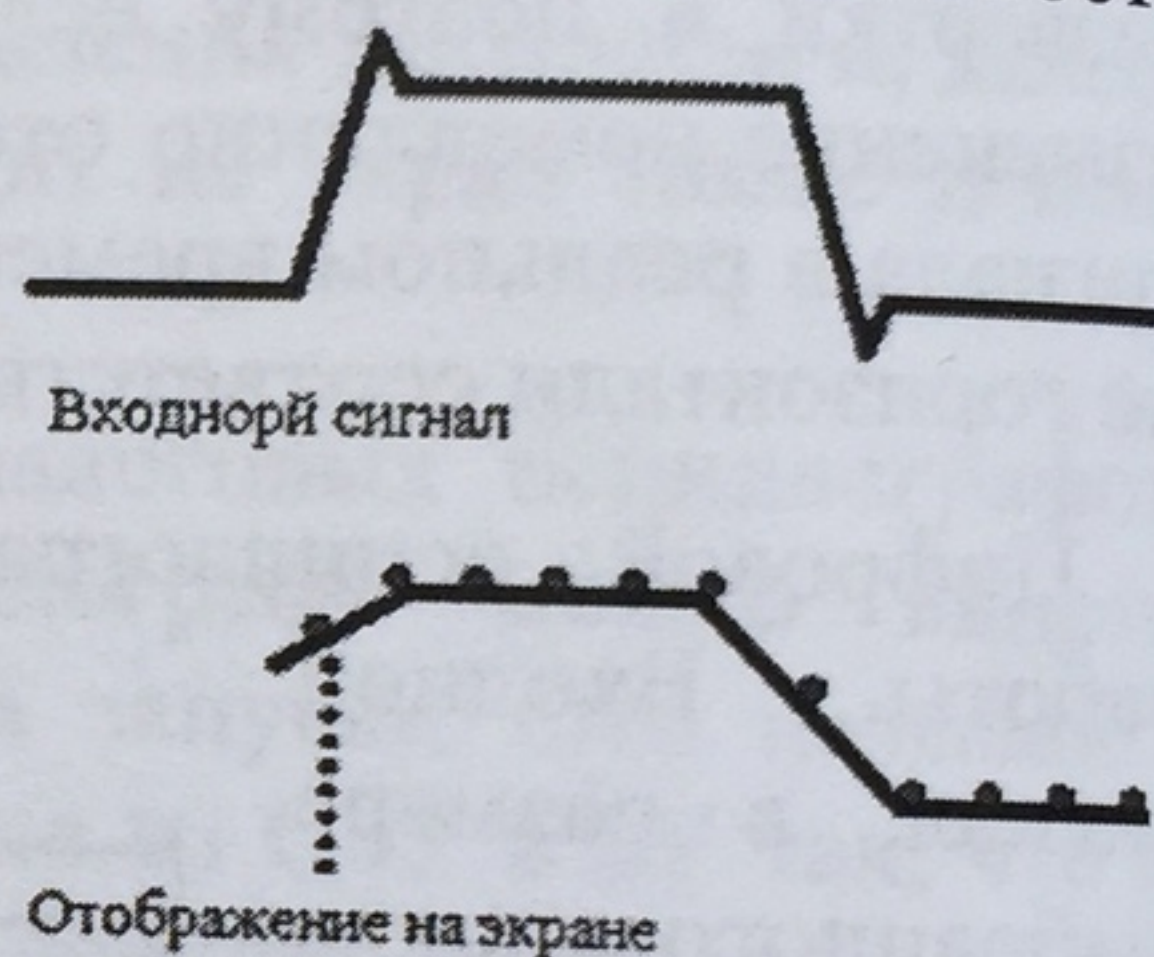
Способы записи сигнала в АЦП могут быть разные в зависимости от производителя, самый простой - выбрать как можно большую частоту дискретизации (исходя из соображений целесообразности и полосы пропускания) и записать их в память. Такая дискретизация, с жестко установленным временем между точками дискретизации, называется периодической (или регулярной). При этом способе дискретизации генератор, задающий шаг дискретизации запускается



однократно, его сигнал показан в виде импульсной последовательности.



Недостатком такого способа является то, что информация между точками дискретизации (наложенные на сигнал точки) теряется безвозвратно, не смотря на высокую скорость дискретизации и объем внутренней памяти, в которой происходит дальнейшая обработка ограничен. Достоинством — простота и самое главное возможность исследовать однократные сигналы с той же достоверностью, что и периодические. Естественно, изменения сигнала между точками дискретизации не отображаются на экране, поэтому отображение сигнала на экране искажается, как показано справа на рисунке, этот "дефект" заложен конструктивно".





## Глава 5. Лабораторные работы

### § 1. Время реакции экспериментатора (7 класс)

**Цель работы:** определить время реакции экспериментатора и сравнить со средним значением 0,3 с, принятым для человека.

#### Теоретическая часть.

В данной работе предлагается измерить время реакции человека с помощью линейки. Эксперимент прост: помощник неожиданно отпускает линейку, экспериментатор зажимает её двумя пальцами так быстро, как сумеет. Рассмотрим особенности опыта.

В начале помощник держит линейку так, что она свисает нулем вниз, экспериментатор держит большой и указательный палец руки так, что нижний конец линейки находится между пальцами и ему легко схватить падающую линейку. Важно, чтобы экспериментатор держал пальцы поближе друг к другу. После того, как помощник отпустит линейку, она успеет пролететь некоторое расстояние  $x$ . Это расстояние можно измерить по делениям линейки, именно поэтому удобно вначале держать пальцы напротив нулевого деления линейки.

Считая движение линейки равноускоренным, можно определить время падения. Запишем закон движения, известный нам из кинематики.

$$y(t) = y_0 + v_0 \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2}$$

Тело прошло расстояние  $x$ , начальная координата равна нулю, начальная скорость равна нулю, ускорение тела – ускорение свободного падения. Тогда закон движения примет вид:  $x = \frac{g \cdot t^2}{2}$ . А время реакции

можно вычислить по формуле  $t = \sqrt{\frac{2x}{g}}$

**Приборы и оборудование:** линейка.

#### Экспериментальная часть.

1. Определите начальное положение линейки.
2. Проведите несколько пробных запусков, убедитесь, что вам удобно ловить линейку. Опишите, как вы будете определять расстояние  $x$ .
3. Проведите серию из 20 измерений.
4. Определите приборную погрешность  $x$ . Определите случайную погрешность  $x$ .
5. Определите погрешность  $x$ .
6. Рассчитайте время реакции экспериментатора и его погрешность.

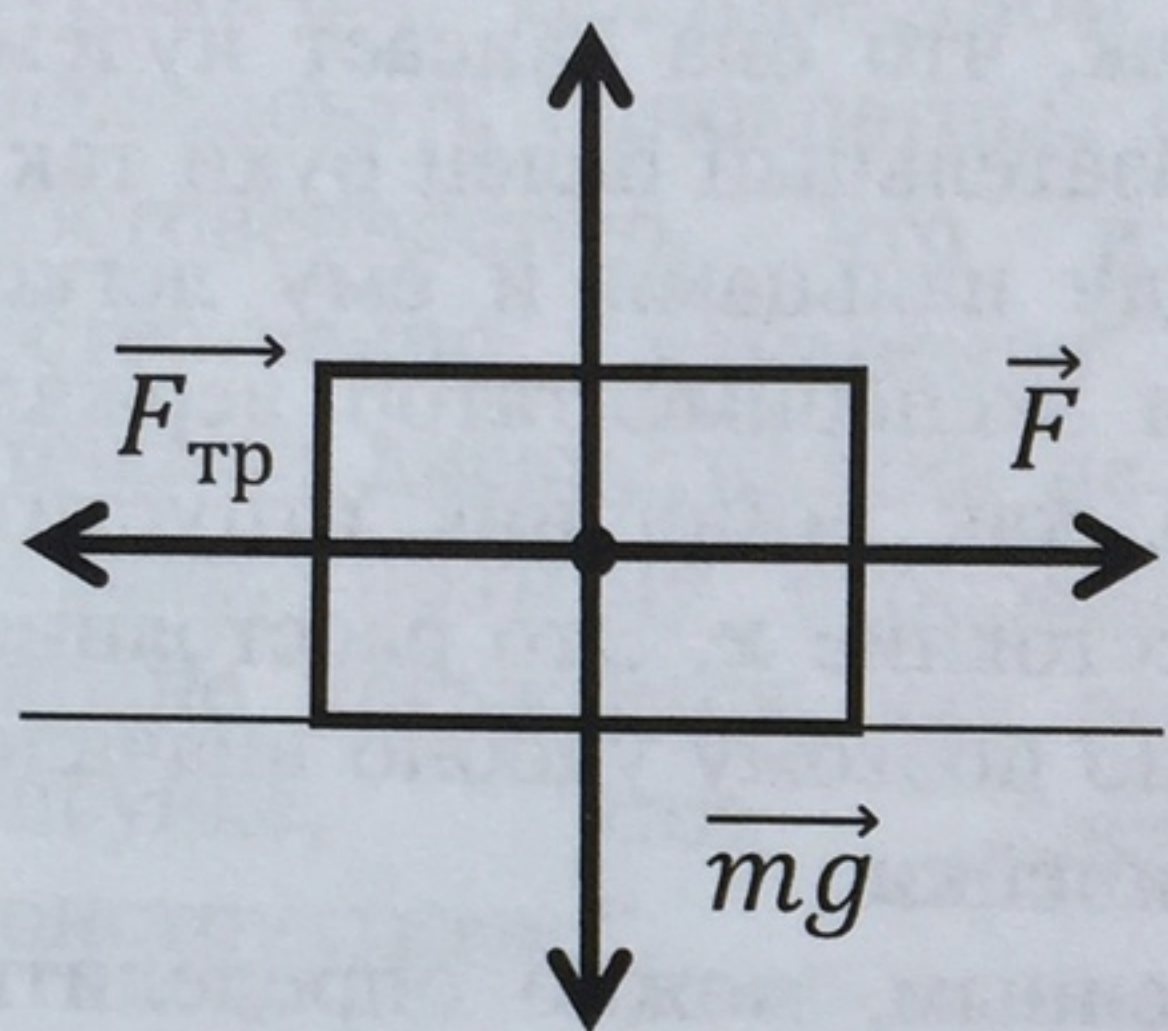


## § 2. Сила трения (7 класс)

**Цель работы:** исследование зависимости силы сухого трения скольжения от веса тела и определение коэффициента трения.

### Теоретическая часть.

Как известно, сила трения скольжения зависит от силы реакции опоры  $F_{\text{тр}} = \mu N$ . Но сила реакции опоры и вес тела – это силы действия и противодействия. По третьему закону Ньютона они равны. Таким образом, сила трения скольжения пропорциональна весу тела  $F_{\text{тр}} = \mu P$ , а коэффициент пропорциональности  $\mu$  – это коэффициент трения.



Рассмотрим ситуацию: брусок движется вправо по плоскости с ускорением  $a$ . На него действуют: сила трения скольжения  $F_{\text{тр}}$ , некая внешняя сила  $F$ , сила тяжести  $mg$ , сила реакции опоры  $N$ . В проекции на горизонтальную ось второй закон Ньютона выглядит следующим образом:

$$F - F_{\text{тр}} = ma$$

Если добиться равномерного движения, ускорение бруска станет равным нулю. Тогда сила трения станет равной внешней силе:  $F_{\text{тр}} = F$ . То есть, если тянуть брусок с постоянной скоростью по плоскости динамометром, то он покажет величину внешней силы  $F$ , равной силе трения. Вес бруска  $P$  можно определить, подвесив его к динамометру.

**Приборы и оборудование:** направляющая, каретка, динамометр, набор грузов.

### Экспериментальная часть.

Вес каретки можно менять, положив на нее дополнительный груз.

1. Проведите серию измерений, используя все грузы, для определения силы трения и веса.
2. По полученным данным постройте график зависимости силы сухого трения скольжения от веса тела.
3. По графику определите коэффициент трения.



### § 3. Закон Гука (7 класс)

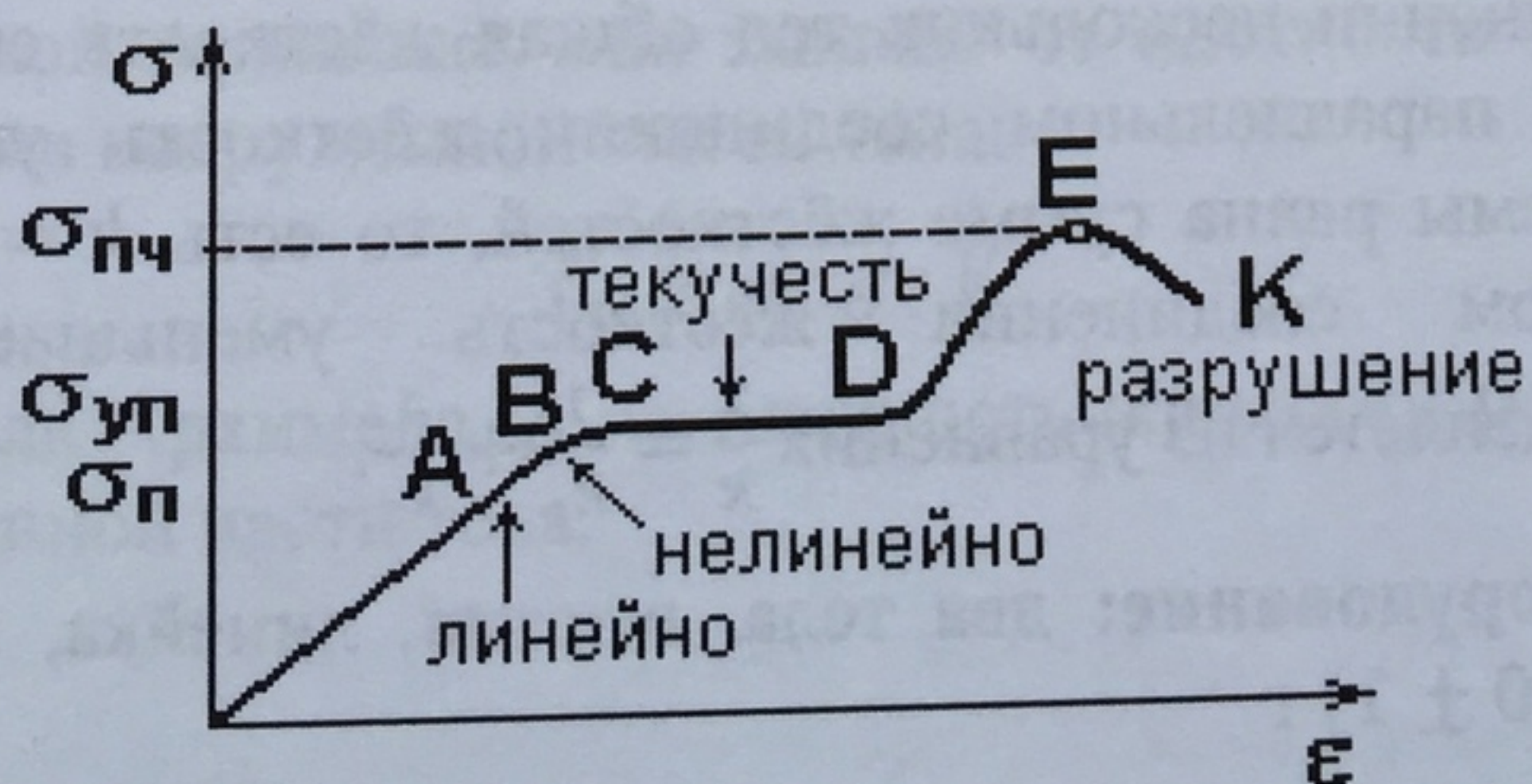
**Цель работы:** проверка закона Гука, определение коэффициента жесткости тела, определение коэффициента жесткости при последовательном и параллельном соединении двух тел.

#### Теоретическая часть.

Деформацией называют изменение формы или размеров тела. Различают деформации четырех видов: растяжение и сжатие, изгиб, кручение, сдвиг. При деформациях твердого тела его частицы (атомы, молекулы, ионы), находящиеся в узлах кристаллической решетки, смещаются из своих положений равновесия. Этому смещению противодействуют силы взаимодействия между частицами твердого тела, удерживающие эти частицы на определенном расстоянии друг от друга. Поэтому в теле возникают внутренние силы, препятствующие его деформации, их называют силами упругости. Силы упругости действуют в любом сечении деформированного тела.

Закон Гука — уравнение, связывающее силу упругости, возникающую в теле при его деформации, с этой деформацией, закон записывается для малых деформаций любых видов: сила упругости, возникающая в теле при его деформации, прямо пропорциональна величине этой деформации. Для деформации растяжения и сжатия:  $F_{\text{упр}} = k \cdot x$ . Здесь  $F_{\text{упр}}$  — сила упругости, возникающая в теле,  $x$  — величина деформации тела (удлинение),  $k$  — коэффициент жесткости.

Отношение деформации к длине тела называется относительным удлинением:  $\varepsilon = \frac{x}{l}$ . Физическая величина, равная отношению модуля силы упругости к площади сечения тела, называется механическим напряжением:  $\sigma = \frac{F_{\text{упр}}}{S}$ . График зависимости напряжения  $\sigma$  от относительного удлинения  $\varepsilon$  называется диаграммой растяжения твердого тела.





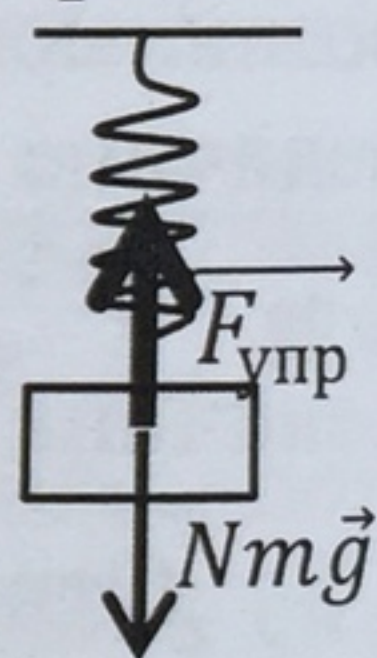
Максимальное напряжение, при котором верен закон Гука, называют пределом пропорциональности.

Если увеличивать нагрузку, то деформация становится нелинейной, напряжение перестает быть прямо пропорционально относительному удлинению. Тем не менее, при небольших нелинейных деформациях после снятия нагрузки форма и размеры тела практически восстанавливаются (участок АВ). Максимальное напряжение, при котором еще не возникают заметные остаточные деформации, называют пределом упругости.

Если внешняя нагрузка такова, что напряжение в материале превышает предел упругости, то после снятия нагрузки тело остается деформированным. При некотором значении напряжения, соответствующем на диаграмме точке С, удлинение нарастает практически без увеличения нагрузки. Это явление называется текучестью материала (участок CD).

Далее с увеличением деформации кривая напряжений начинает немного возрастать и достигает максимума в точке Е. Затем напряжение резко падает и тело разрушается. Разрыв происходит после того, как напряжение достигает максимального значения, называемого пределом прочности, возникающего в теле до его разрушения.

В эксперименте проверяется закон Гука. Подвешивая различное количество грузов  $N$ , можно определить зависимость силы упругости, возникающей в теле от его деформации.



Напишем второй закон Ньютона для подвешенного груза. На него действуют сила упругости со стороны тела и сила тяжести:  $N \cdot mg - F_{\text{упр}} = 0$ . Таким образом, получаем  $F_{\text{упр}} = N \cdot mg$ . Величину деформации тела будем определять по формуле  $x = l - l_0$ , где  $l$  — это длина тела при  $N$  подвешенных грузах, а  $l_0$  — это его начальная длина.

При соединении нескольких тел общая жёсткость системы будет меняться. При параллельном соединении жёсткость увеличивается: жёсткость системы равна сумме жёсткостей, то есть  $k = k_1 + k_2$ . При последовательном соединении жёсткость уменьшается: общая жёсткость определяется из уравнения  $\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}$ .

**Приборы и оборудование:** два тела, штатив, линейка, грузы массой  $(100 \pm 2)$  г и  $(50 \pm 1)$  г



### Экспериментальная часть.

1. Определите начальную длину тела  $l_0$ , подвесив груз массой 100 г.
2. Проведите серию измерений по определению величин  $N$  и  $l$ .
3. Повторите эксперимент для второго тела.
4. Повторите эксперимент для последовательного и параллельного соединения тел.
5. Определите величину деформации и соответствующую силу упругости в каждом эксперименте. Внимание! Ускорение свободного падения принять равным:  $g = 9,815 \text{ м/с}^2$
6. Определите погрешности при измерении деформации и силы упругости в каждом эксперименте.
7. Постройте графики зависимости силы упругости от деформации тела. Все графики рисовать на разных листах.
8. По графику определите коэффициент жесткости тела в каждом эксперименте, оцените погрешность.
9. Сравните результаты для последовательного и параллельного соединения тел с вычисленными по формулам.
10. Что такое модуль Юнга? Как должен выглядеть график зависимости силы упругости от деформации тела при больших деформациях и почему?
11. Выведете формулы для расчета коэффициента жесткости системы из двух тел при последовательном и параллельном соединении.

### § 4. Сила Архимеда (7 класс)

**Цель работы:** исследование зависимости силы Архимеда от объема погруженного тела и определение плотности жидкости.

#### Теоретическая часть.

На тело, погружённое в жидкость, действует выталкивающая сила, равная весу вытесненной этим телом жидкости (или газа). Эта сила называется силой Архимеда, она зависит от плотности жидкости (или газа) и от объема погруженной части тела:

$$F_A = \rho \cdot g \cdot V$$

Здесь  $F_A$  — сила Архимеда,  $\rho$  — плотность жидкости (или газа),  $V$  — объем погруженной части тела.



Напишем второй закон Ньютона для груза, подвешенного на динамометре в двух случаях: в воздухе и в воде (груз полностью погружен). В первом случае на него действует сила  $F_1$  со стороны динамометра и сила тяжести:

$$mg - F_1 = 0$$

Во втором случае на него действует сила  $F_2$  со стороны динамометра, сила Архимеда  $F_A$  и сила тяжести:

$$mg - F_2 - F_A = 0$$

Таким образом, получаем выражение для определения силы Архимеда:  $F_A = F_1 - F_2$ .

Объем тела измеряется путем погружения в мензурку с водой.

**Приборы и оборудование:** динамометр, набор грузов, мензурка с водой.

**Экспериментальная часть.**

1. Проведите серию измерений с набором грузов. Запишите значения  $F_1, F_2$  и определите величину силы Архимеда. Измерьте объем тела.
2. Постройте график зависимости силы Архимеда от объема. Определите коэффициент наклона графика.
3. Определите плотность жидкости.

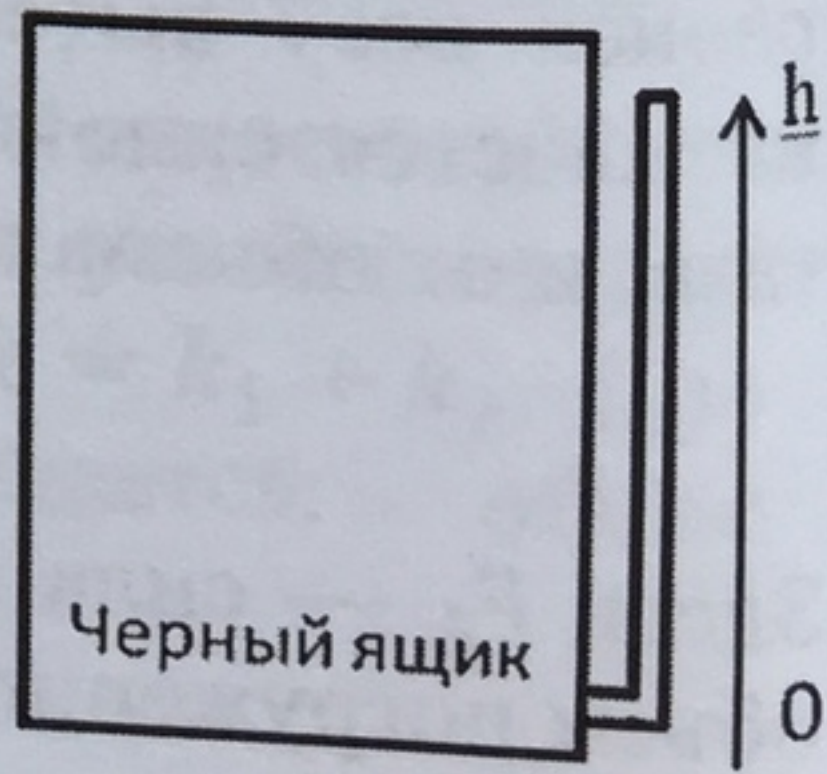
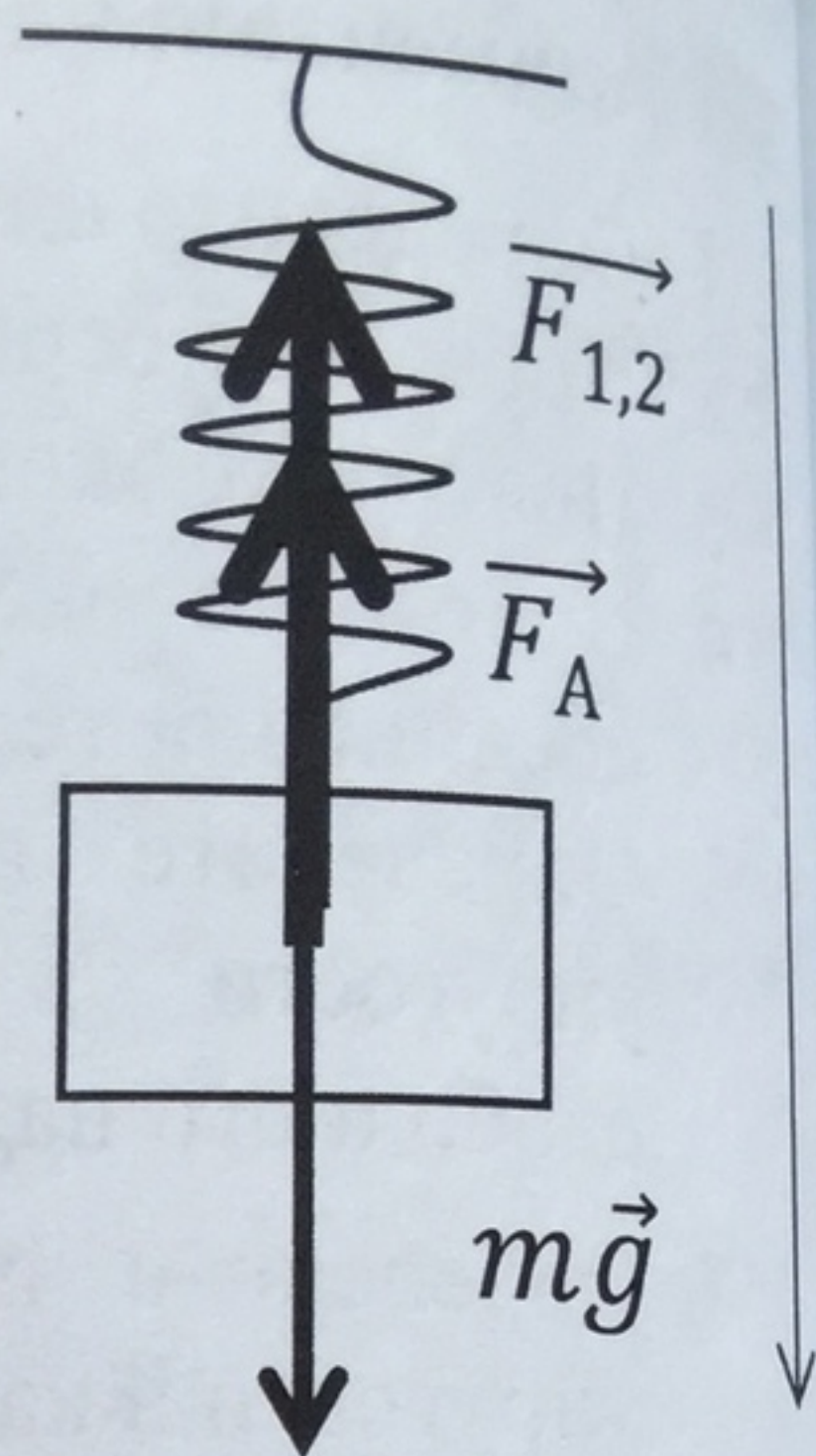
## § 5. Черный ящик с манометром (7 класс)

**Цель работы:** исследование строения черного ящика.

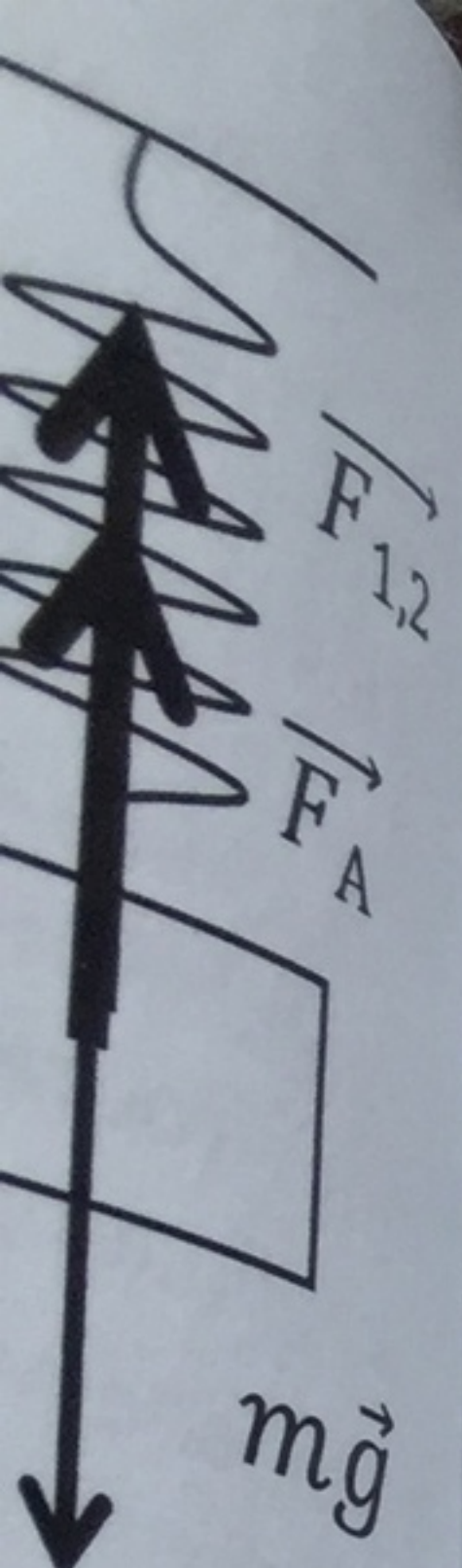
**Теоретическая часть.**

В данной работе предлагается определить строение черного ящика и измерить его внутреннюю площадь сечения. Измерения проводятся, используя закон сообщающихся сосудов: в сообщающихся сосудах уровни однородных жидкостей равны.

Схема установки показана на рисунке. Черный ящик с манометром представляет собой непрозрачный сосуд с тонкой трубкой. Сверху в ящике сделано отверстие для вливания воды, рядом с трубкой закреплена линейка. По







закону сообщающихся сосудов, уровень жидкости в ящике должен быть равен уровню жидкости в трубке, обозначим его  $h$ . Если влить в ящик воду объемом  $\Delta V$ , то уровень жидкости изменится на величину  $\Delta h$ . Тогда можно утверждать, что  $\Delta V = S \cdot \Delta h + S_0 \cdot \Delta h$ . Здесь  $S$  – площадь сечения черного ящика,  $S_0$  – площадь сечения трубки.

Предположим, что объем воды, находящийся в трубке, много меньше объема воды в черном ящике (так как  $S_0 \ll S$ ). Тогда уравнение упрощается:  $\Delta V = S \cdot \Delta h$ . Отсюда легко найти зависимость площади сечения черного ящика от его высоты:

$$V = S \cdot h$$

Если сечение черного ящика не постоянно (изменяется  $S$ ), зависимость не будет являться прямой пропорциональностью.

**Приборы и оборудование:** черный ящик с манометром, мензурка.

Рекомендуемый шаг снятия зависимости 1 см:  $h_1 = 1$  см,  $h_2 = 2$  см ... Рекомендуемое количество точек – не менее 15 (измерение проводить в полном диапазоне  $h$ ). Желательно снимать зависимость, обойдясь без выливания жидкости из черного ящика. При проведении дополнительных измерений рекомендуется полностью вылить воду и заново повышать уровень жидкости.

**Экспериментальная часть.**

1. Изучите черный ящик. Определите возможное начальное значение  $h_1$ , максимальное  $h_{max}$
2. Налейте воду до уровня  $h_1$ . Запишите объем влитой жидкости  $V_1$ .
3. Проведите серию измерений, записывая значения  $h$  и  $V$ .
4. Постройте график зависимости  $V(h)$
5. Проанализируйте зависимость и сделайте вывод о конструкции черного ящика.
6. Нарисуйте схему черного ящика с указанием площади сечения  $S$  внутренней части.
7. Оцените погрешности.

## § 6. Гидростатическое взвешивание (7 класс)

**Цель работы:** определение плотности тела неправильной формы.

**Теоретическая часть.**

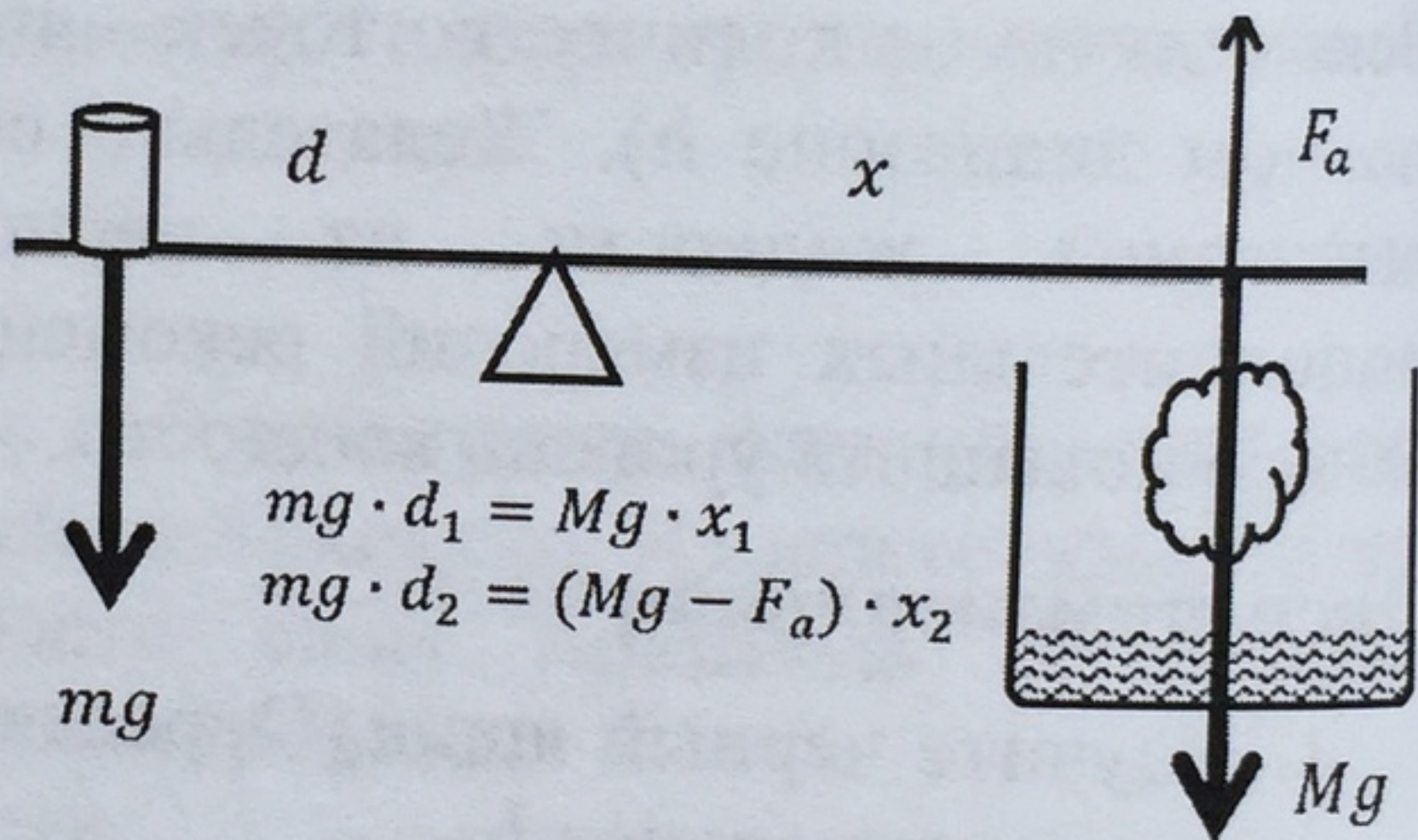


Самый простой способ определения плотности тела – это измерить его массу и геометрические параметры. Однако, не всегда тела имеют правильную форму, и измерение объема становится проблематичным. Существует два способа для измерения плотности тела неправильной формы.

**1 способ.** Масса измеряется на весах, объем измеряется с помощью мензурки – объем тела равен объему вытесненной жидкости. Плотность тела вычисляется по формуле  $\rho = \frac{m}{v}$

**2 способ.** Метод называется «гидростатическое взвешивание», он основан на законе Архимеда. Если провести взвешивание тела в воздухе, то весы покажут силу, действующую на них – силу тяжести. Если же провести взвешивание в воде, то весы покажут разность силы тяжести и силы Архимеда. Таким образом, сила Архимеда равна разности показаний весов в воздухе и воде.

Рассмотрим эксперимент: вместо весов будем использовать невесомый рычаг. Пусть у нас есть гирька заданной массы  $m$ . Уравновесим тело массой  $M$ , плотность которого нужно найти, гирькой и измерим расстояния от опоры до гирьки  $d$  и от опоры до тела  $x$  (рисунок).



По правилу рычага:  $mg \cdot d_1 = Mg \cdot x_1$ . Теперь проведем взвешивание в воде:  $mg \cdot d_2 = (Mg - F_a) \cdot x_2$

Преобразуем второе уравнение, используя формулу для плотности и силы Архимеда.

$$mg \cdot d_2 = (\rho V \cdot g - \rho_{\text{в}} g V) \cdot x_2 = (\rho - \rho_{\text{в}}) V g x_2 \Rightarrow m \cdot d_2 = (\rho - \rho_{\text{в}}) V x_2$$

Здесь  $V$  – объем тела, который можно найти из первого уравнения:

$$mg \cdot d_1 = Mg \cdot x_1 = \rho V \cdot g \cdot x_1 \Rightarrow m \cdot d_1 = \rho V \cdot x_1 \Rightarrow V = \frac{m d_1}{\rho x_1}$$

Подставляем найденный объем в первое уравнение.

$$m d_2 = (\rho - \rho_{\text{в}}) \frac{m d_1}{\rho x_1} x_2 \Rightarrow d_2 = \left(1 - \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho}\right) \frac{d_1}{x_1} x_2$$

Выразим плотность тела.



$$1 - \frac{\rho_B}{\rho} = \frac{d_2 x_1}{d_1 x_2} \Rightarrow \frac{\rho_B}{\rho} = 1 - \frac{d_2 x_1}{d_1 x_2} = \frac{d_1 x_2 - d_2 x_1}{d_1 x_2} \Rightarrow \rho = \rho_B \cdot \frac{d_1 x_2}{d_1 x_2 - d_2 x_1}$$

**Приборы и оборудование:** линейка, мензурка, гирька заданной массы, тело неправильной формы, весы.

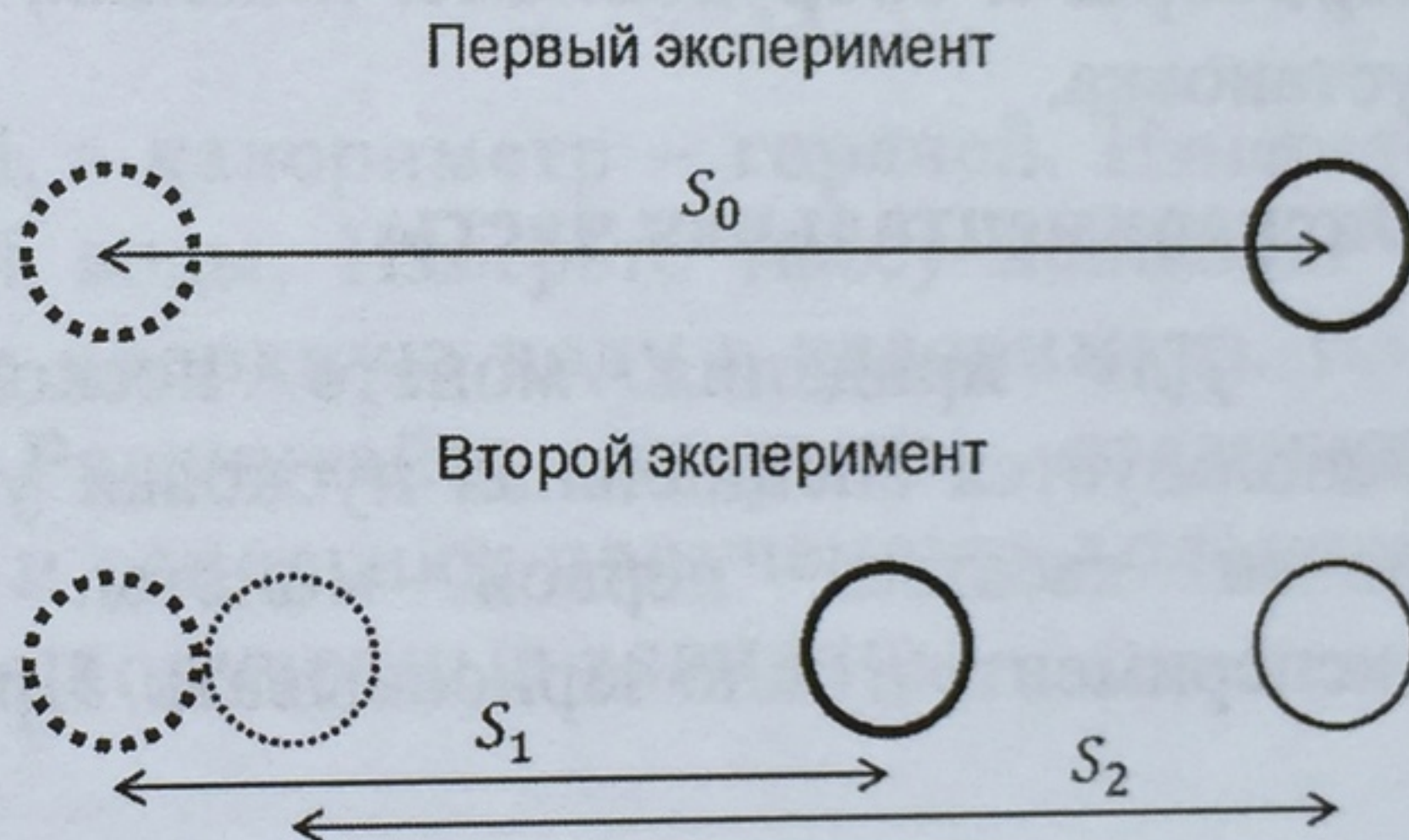
## § 7. Потери энергии (7 класс)

**Цель работы:** оценить потери энергии при частично упругом ударе.

**Теоретическая часть.**

При решении задач, как правило, рассматриваются два вида ударов: абсолютно упругий или абсолютно неупругий. Однако, в жизни мы сталкиваемся с неидеализированным явлением – частично упругим ударом. При таком взаимодействии тела не «слипаются», но часть энергии системы теряется (работа непотенциальных сил). Данная задача посвящена оценке этого процента.

Рассмотрим следующий эксперимент: монета скользит по горизонтальной плоскости, имеющей коэффициент трения  $\mu$ . Она налетает на неподвижную мишень (вторая монета), происходит частично упругий удар. Вследствие удара монета и мишень двигаются по плоскости до полной остановки.



Напишем закон изменения энергии:

$$A = (E'_1 + E'_2) - E_1$$

Здесь  $A$  – работа непотенциальных сил,  $E_1$  и  $E'_1$  – кинетическая энергия монеты до и после удара,  $E'_2$  – кинетическая энергия мишени после удара. Расчёт работы представляет собой сложную задачу. Зато оценка доли величины  $A$  от начальной энергии системы ( $E_1$ ) проводится просто.

$$\frac{A}{E_1} = \frac{(E'_1 + E'_2) - E_1}{E_1} = \frac{E'_1}{E_1} + \frac{E'_2}{E_1} - 1$$

Отметим, что величина  $\frac{A}{E_1}$  отрицательна, введем положительную величину  $K = -\frac{A}{E_1}$ .



$$K = 1 - \frac{E'_1}{E_1} - \frac{E'_2}{E_1}$$

Величины кинетических энергий  $E'_1$  и  $E'_2$  будем определять следующим образом. Если после соударения монета и мишень до полной остановки пройдут расстояния  $S_1$  и  $S_2$  соответственно, то кинетические энергии будут равны работам сил трения:  $E'_1 = \mu N_1 \cdot S_1$  и  $E'_2 = \mu N_2 \cdot S_2$ . Для упрощения расчетов возьмем монету и мишень одинаковой массы  $m$ . Тогда  $N_1 = N_2 = mg$ . Запишем итоговые выражения для энергий.

$$E'_1 = \mu mg \cdot S_1$$

$$E'_2 = \mu mg \cdot S_2$$

Для определения величины  $E_1$  проведем дополнительный эксперимент: монета скользит по горизонтальной плоскости до полной остановки, без удара по мишени.  $E_1 = \mu mg \cdot S_0$ .

$$K = 1 - \frac{\mu mg \cdot S_1}{\mu mg \cdot S_0} - \frac{\mu mg \cdot S_2}{\mu mg \cdot S_0} = 1 - \frac{S_1}{S_0} - \frac{S_2}{S_0} \Rightarrow K = 1 - \frac{S_1 + S_2}{S_0}$$

**Приборы и оборудование:** линейка, две одинаковые монеты, пусковая установка.

#### Экспериментальная часть.

Для придания монете несколько раз одинаковой скорости используется специальная пусковая установка. Монета-мишень должна почти касаться первой монеты. Каждое положение монеты в эксперименте нужно зарисовывать. Провести не менее 15 экспериментов

### § 8. Внутренняя энергия (8 класс)

**Цель работы:** исследование процессов теплообмена и остывания тел.

#### Теоретическая часть.

Измерения показывают, что энергия  $Q$ , которую надо передать телу, чтобы нагреть его от начальной температуры  $t_n$  до конечной температуры  $t_k$ , прямо пропорционально массе тела  $m$  и разности этих температур:

$$Q = cm(t_k - t_n)$$

Величину  $c$  в этой формуле называют удельной теплоёмкостью вещества, из которого состоит данное тело. Она численно равна количеству теплоты, которое надо сообщить телу массой 1 кг,



состоящему из этого вещества, чтобы повысить температуру тела на 1 °С. Для воды экспериментально получено значение  $c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$ .

Соответственно определяется и энергия, отданная телом для остывания от начальной температуры  $t_n$  до конечной температуры  $t_k$ :  $Q = cm(t_k - t_n)$ . Только в случае остывания конечная температура будет меньше начальной, и разность  $t_k - t_n$  будет меньше нуля. То есть, энергия, отданная телом при остывании, имеет отрицательный знак!

В эксперименте будет использоваться специальное оборудование: калориметр. Калориметр состоит из двух сосудов, разделённых веществом с низкой теплопроводностью. Такое устройство позволяет уменьшать теплообмен содержимого внутреннего сосуда с внешней средой.

**Приборы и оборудование:** калориметр, стакан, термометр, весы с гирями.

**Экспериментальная часть.**

*Задание 1.*

Наполните стакан холодной водой, а калориметр – горячей. Измерьте температуру холодной и горячей воды. Измерьте массу холодной и горячей воды. Осторожно влейте холодную воду в калориметр. Измерьте температуру смеси. Рассчитайте энергию, отданную горячей водой при остывании, и энергию, полученную холодной водой при нагревании. Сравните полученные величины.

*Задание 2.*

Аккуратно вытащите внутренний стакан калориметра. Наполните стакан горячей водой. Снимите зависимость температуры воды от времени с шагом 30 с (общее время 7-8 минут) и нарисуйте график.

## § 9. Удельная теплоемкость (8 класс)

**Цель работы:** определить металл цилиндров, оценить тепловые потери при использовании калориметра.

**Теоретическая часть.**

Удельная теплоемкость является характеристикой вещества, у разных веществ она различна. Величина удельной теплоемкости зависит от агрегатного состояния вещества: для воды  $c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$ , а для льда



$c = 2100 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ . На значение удельной теплоемкости также влияет температура вещества. В таблице приведены значения удельной теплоемкости воды при различных температурах. Легко заметить, что отклонение от общепринятого значения составляет менее 0,5%.

$t, ^\circ\text{C}$	$c, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	$t, ^\circ\text{C}$	$c, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	$t, ^\circ\text{C}$	$c, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	$t, ^\circ\text{C}$	$c, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	$t, ^\circ\text{C}$	$c, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$
1	4,213	21	4,181	41	4,179	61	4,185	81	4,197
2	4,210	22	4,181	42	4,179	62	4,186	82	4,198
3	4,207	23	4,180	43	4,179	63	4,186	83	4,199
4	4,205	24	4,180	44	4,179	64	4,187	84	4,200
5	4,202	25	4,180	45	4,180	65	4,187	85	4,200
6	4,200	26	4,179	46	4,180	66	4,188	86	4,201
7	4,198	27	4,179	47	4,180	67	4,188	87	4,202
8	4,196	28	4,179	48	4,180	68	4,189	88	4,203
9	4,194	29	4,179	49	4,181	69	4,189	89	4,204
10	4,192	30	4,178	50	4,181	70	4,190	90	4,205
11	4,191	31	4,178	51	4,181	71	4,190	91	4,206
12	4,189	32	4,178	52	4,182	72	4,191	92	4,207
13	4,188	33	4,178	53	4,182	73	4,192	93	4,208
14	4,187	34	4,178	54	4,182	74	4,192	94	4,209
15	4,186	35	4,178	55	4,183	75	4,193	95	4,210
16	4,185	36	4,178	56	4,183	76	4,194	96	4,211
17	4,184	37	4,178	57	4,183	77	4,194	97	4,212
18	4,183	38	4,178	58	4,184	78	4,195	98	4,213
19	4,182	39	4,179	59	4,184	79	4,196	99	4,214
20	4,182	40	4,179	60	4,185	80	4,196	100	4,216

Пусть цилиндр с удельной теплоемкостью  $c_{\text{ц}}$  имеет массу  $m_{\text{ц}}$  и начальную температуру  $t_{\text{ц}}$ . Опустим его в воду массы  $m_{\text{в}}$ , имеющую температуру  $t_{\text{в}}$ . Установится термодинамическое равновесие, обозначим итоговую температуру цилиндра и воды  $t$ . Уравнение теплового баланса:  $c_{\text{ц}}m_{\text{ц}}(t - t_{\text{ц}}) + c_{\text{в}}m_{\text{в}}(t - t_{\text{в}}) = 0$ . Отсюда получаем выражение для неизвестной теплоемкости:

$$c_{\text{ц}} = c_{\text{в}} \frac{m_{\text{в}}(t_{\text{в}} - t)}{m_{\text{ц}}(t - t_{\text{ц}})}$$

**Приборы и оборудование:** калориметр, весы с гирьками, термометр, цилиндры на нитях, секундомер.

**Экспериментальная часть.**



### Задание 1.

Определите массу цилиндра  $m_{\text{ц}}$  и его начальную температуру  $t_{\text{ц}}$ . Наполните калориметр горячей водой, измерьте ее температуру и массу. Опустите цилиндр в калориметр, после установления термодинамического равновесия определите конечную температуру  $t$ .

### Задание 2.

Используя воду из предыдущего эксперимента (цилиндр вытащить), снимите зависимость температуры воды в калориметре от времени с шагом 30 с (общее время 5 минут). Оцените потери энергии при использовании калориметра (в процентах).

## § 10. Кристаллизация и влажность (8 класс)

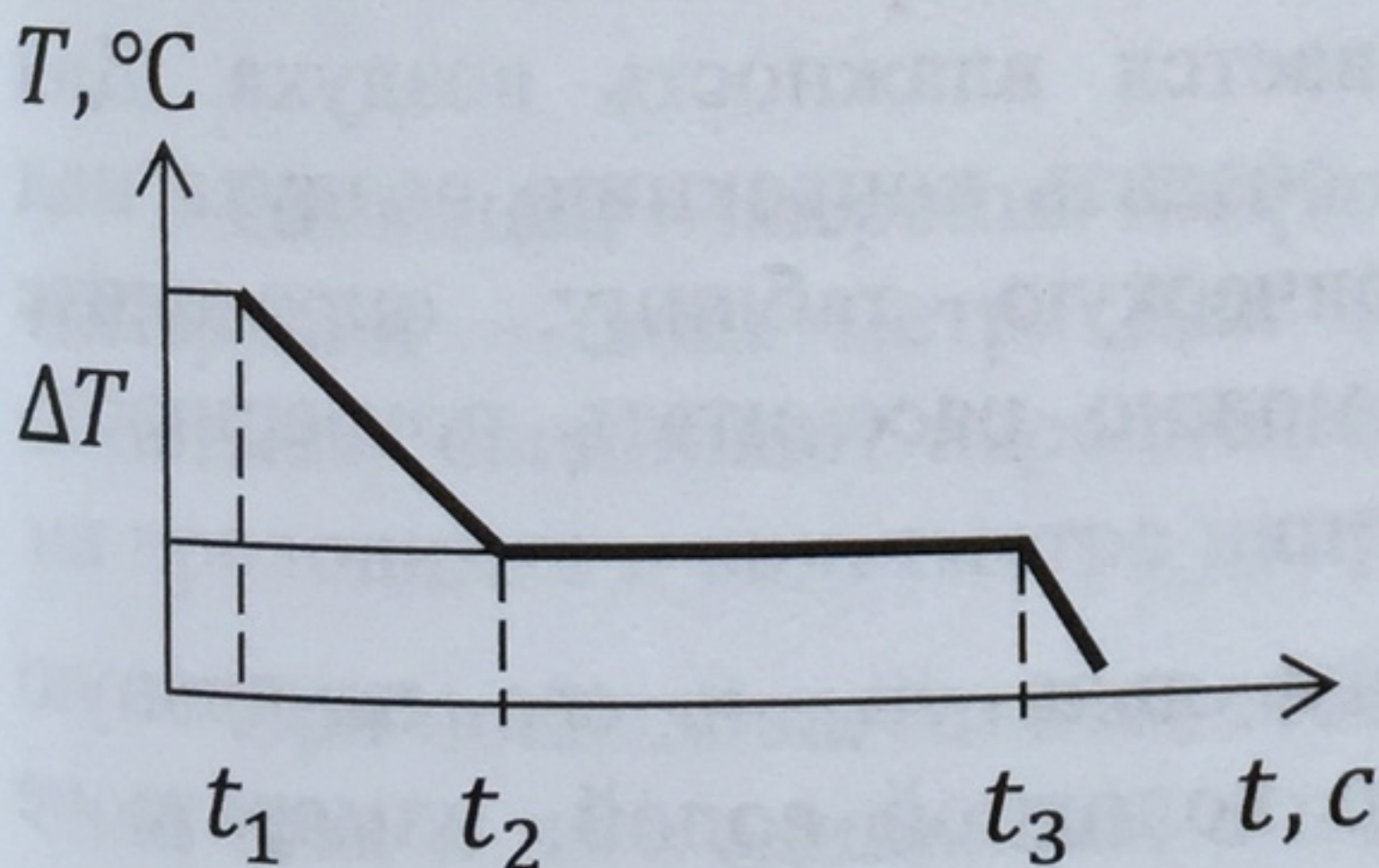
**Цель работы:** исследование процесса кристаллизации и определение влажности воздуха.

### Теоретическая часть.

*Кристаллизация* – процесс перехода из жидкого агрегатного состояния в твердое. Теплота, отданная телом, рассчитывается по формуле  $Q = -\lambda m$ .

Рассмотрим процесс остывания и кристаллизации тела. Нарисуем график зависимости температуры тела от времени. На первом участке ( $t_1 - t_2$ ) тело охлаждается, теплота рассчитывается по формуле  $Q_1 = -cm|\Delta T|$ . На втором участке ( $t_2 - t_3$ ) тело кристаллизуется, теплота рассчитывается по формуле  $Q_2 = -\lambda m$ .

Рассчитаем тепло, отданное телом в единицу времени, для этих участков.



$$\frac{Q_1}{t_2 - t_1} = \frac{-cm|\Delta T|}{t_2 - t_1}$$

$$\frac{Q_2}{t_3 - t_2} = \frac{-\lambda m}{t_3 - t_2}$$

Если скорость теплообмена с окружающей средой постоянна, тогда тепло, отданное телом в единицу времени, является постоянной величиной.



$$\frac{-cm|\Delta T|}{t_2 - t_1} = \frac{-\lambda m}{t_3 - t_2}$$

Из этого соотношения выразим параметр  $B = \frac{\lambda}{c}$ , характеризующий вещество.

$$B = \frac{\lambda}{c} = |\Delta T| \cdot \frac{t_3 - t_2}{t_2 - t_1}$$

**Психрометр** — прибор для измерения влажности воздуха и его температуры. Психрометр состоит из двух одинаковых термометров, один из которых обмотан влажной тканью. При испарении воды из ткани термометр охлаждается, его показания будут меньше. Чем интенсивнее испаряется вода, тем ниже показания влажного термометра. Зная показания сухого и влажного термометра, по психрометрической таблице можно определить относительную влажность воздуха.

**Приборы и оборудование:** калориметр, весы с гирьками, термометр, пробирка с парафином, лед, вода.

#### Экспериментальная часть.

**Задание 1.** Наполните калориметр горячей водой. Опустите в калориметр пробирку с парафином и полностью расплавьте вещество. Вытащите пробирку из калориметра и снимите зависимость температуры вещества от времени с шагом 30с (10 – 12 минут). Нарисуйте график зависимости температуры парафина от времени, вычислите параметр  $B$ .

**Задание 2.** Определите температуру сухим и влажным термометром. Так как испарившаяся влага остаётся в окрестностях влажного термометра, то вокруг него увеличивается влажность воздуха. Для устранения этого эффекта необходимо создать конвекцию воздуха над термометром. Используя психрометрическую таблицу, определите влажность воздуха. Каким способом можно рассчитать погрешность полученного значения?

**Задание 3.** Определите массу кусочка льда  $m_{\text{л}}$  и его начальную температуру  $t_{\text{л}}$ . Наполните калориметр холодной водой, измерьте ее температуру  $t_{\text{в}}$  и массу  $m_{\text{в}}$ . Опустите в калориметр лед, после установления термодинамического равновесия определите конечную температуру  $t$ . Выведете формулу для расчета параметра  $B = \frac{\lambda}{c}$  для воды. Сравните полученные результаты с табличными данными.



## § 11. Последовательное и параллельное соединение (8 класс)

**Цель работы:** исследование последовательного и параллельного соединения элементов в электрической цепи.

### Теоретическая часть.

Когда по проводнику течёт электрический ток, заряженные частицы ежесекундно переносят электрический заряд через любое поперечное сечение проводника. Физическую величину  $I$ , равную отношению электрического заряда  $q$ , перенесённого через поперечное сечение проводника за промежуток времени  $t$ , к этому промежутку времени, называют **силой тока**:

$$I = \frac{q}{t}$$

Единицей измерения силы тока является «Ампер» (А), прибор для измерения — амперметр. Для измерения силы тока в проводнике амперметр подключают последовательно с этим проводником — в этом случае через проводник и амперметр идёт одинаковый ток.

Когда по проводнику идёт ток, электрическое поле в проводнике действует на движущиеся заряженные частицы и поэтому совершает работу. Физическую величину  $U$ , равную отношению работы  $A$  электрического поля по перемещению заряда  $q$  на данном участке цепи к значению этого заряда называют **напряжением** на данном участке цепи:

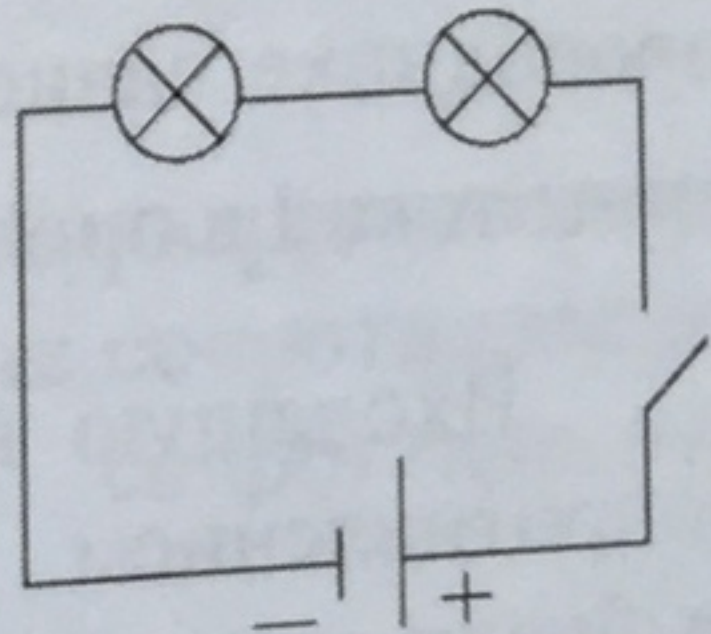
$$U = \frac{A}{q}$$

Единицей измерения напряжения является «Вольт» (В), прибор для измерения — вольтметр. Для измерения напряжения на проводнике вольтметр соединяют параллельно с этим проводником — в этом случае на проводнике и вольтметре напряжение одинаково.

При последовательном соединении проводников сила тока в них одинакова, а напряжение на участке цепи, состоящем из этих проводников, равно сумме напряжений на проводниках:

$$I = I_1 = I_2$$

$$U = U_1 + U_2$$

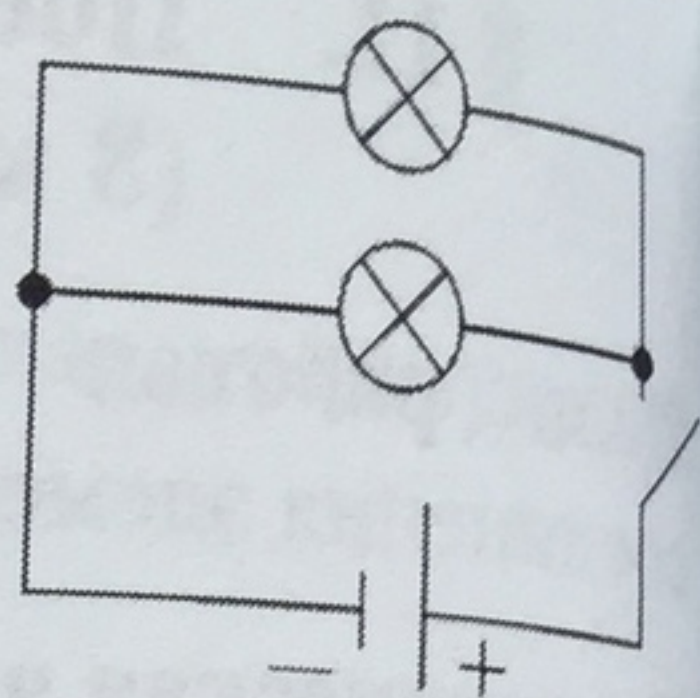




При параллельном соединении проводников напряжение на них одинаково, а сила тока на участке цепи, состоящем из этих проводников, равна сумме сил токов в проводниках:

$$U = U_1 = U_2$$

$$I = I_1 + I_2$$



**Приборы и оборудование:** батарейка, амперметр, вольтметр, соединительные провода, лампочки, ключ.

### Экспериментальная часть.

#### Задание 1.

Нарисуйте цепь с последовательным соединением двух лампочек. Добавьте в рисунок амперметр и вольтметр, измеряющие силу тока и напряжение на первой лампочке. Соберите цепь. Запишите показания приборов. Проведите измерения для обеих лампочек, для батарейки. Выполняются ли законы для силы тока и напряжения в цепи?

#### Задание 2.

Нарисуйте цепь с параллельным соединением двух лампочек. Добавьте в рисунок амперметр и вольтметр, измеряющие силу тока и напряжение на первой лампочке. Соберите цепь. Запишите показания приборов. Проведите измерения для обеих лампочек, для батарейки. Выполняются ли законы для силы тока и напряжения в цепи?

## § 12. Вольт-амперная характеристика резистора (8 класс)

**Цель работы:** исследование реостата, построение вольт-амперной характеристики и определение сопротивления резистора.

### Теоретическая часть.

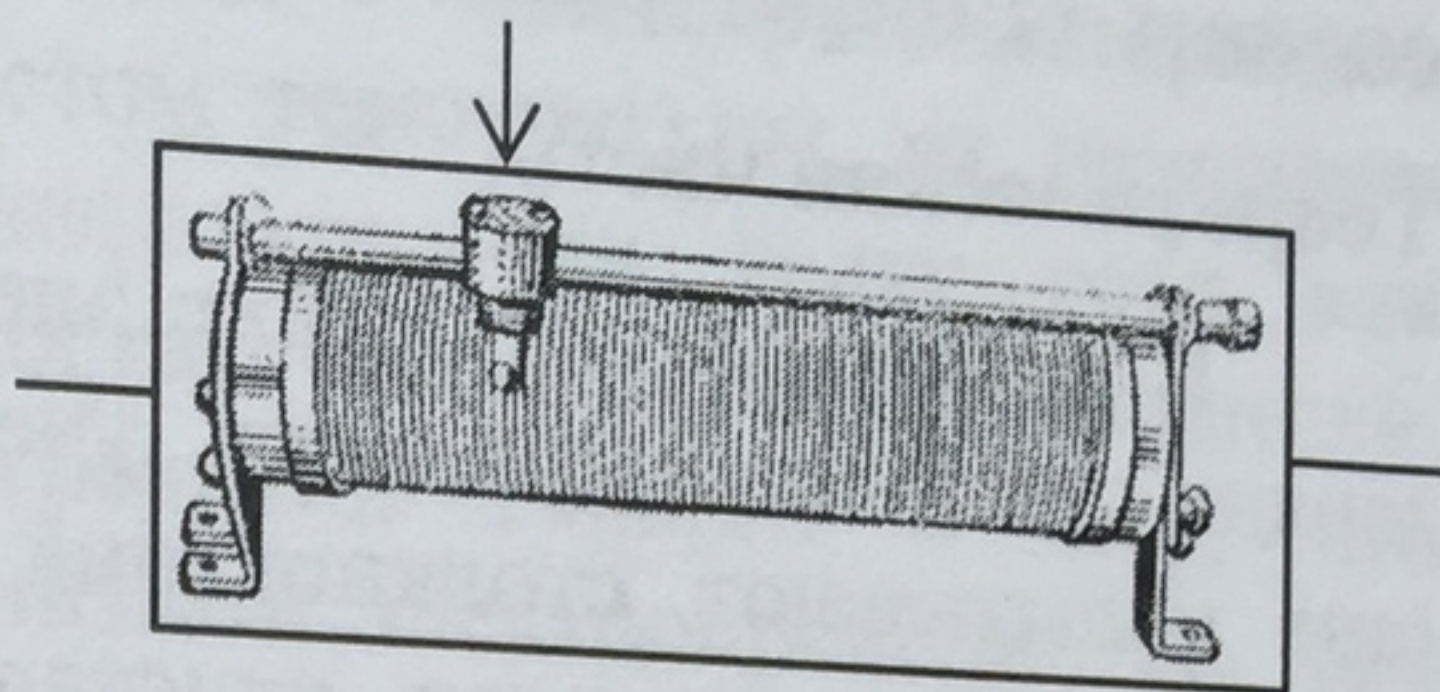
Исследуя электрические цепи, ученые обнаружили, что сила тока в проводнике зависит от напряжения на этом проводнике. Зависимость силы тока  $I$  в проводнике от напряжения  $U$  записывают в виде  $I = \frac{U}{R}$ .

Входящую в эту формулу величину  $R$  называют электрическим сопротивлением проводника. В качестве единицы сопротивления выбрали сопротивление такого проводника, в котором сила тока равна 1 А при напряжении 1 В. Эту единицу сопротивления обозначают «Ом».

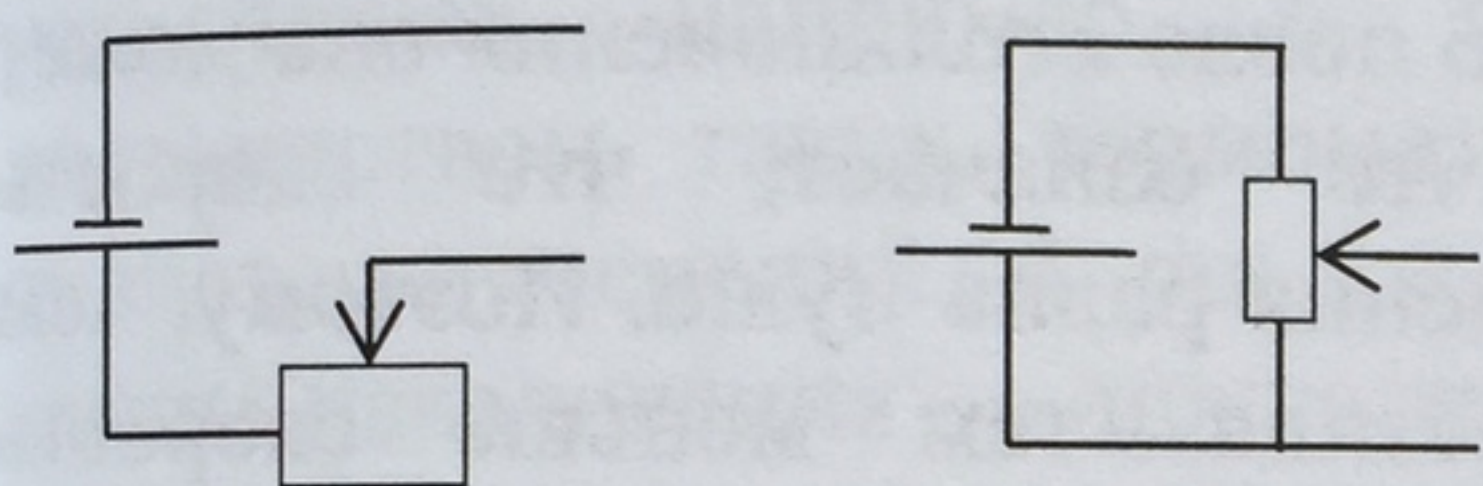


В качестве проводников мы будем использовать так называемые резисторы. На электрических схемах резистор изображают прямоугольником. Резисторы обладают постоянным сопротивлением, сила тока пропорциональна напряжению.

Для построения графика зависимости силы тока от напряжения (вольт-амперной характеристики) необходимо подавать разное напряжение на резистор. Для изменения силы тока в



цепи часто используют резисторы с переменным сопротивлением, называемые реостатами. При изменении положения ползунка реостата изменяется длина той части обмотки, через которую проходит ток — а вследствие этого изменяется и сопротивление реостата.



Возможны две принципиально разные схемы подключения реостата к батарее: последовательно и параллельно.

**Приборы и оборудование:** батарейка, амперметр, вольтметр, соединительные провода, резисторы, реостат, ключ.

### Экспериментальная часть.

#### Задание 1.

Нарисуйте цепь с последовательным соединением батарейки и реостата. Добавьте в рисунок амперметр и вольтметр, измеряющие силу тока и напряжение на резисторе. Соберите цепь. Запишите показания приборов в крайних положениях ползунка реостата. Проведите аналогичные измерения для параллельного соединения батарейки и реостата. Проанализируйте полученные данные и выберите соединение для снятия вольт-амперной характеристики резистора.

#### Задание 2.

Проведите серию измерений тока и напряжения для обоих резисторов. Постройте вольт-амперные характеристики и определите сопротивление резистора. Сравните с теоретическим значением сопротивлений резисторов: 6 Ом и 12 Ом.



### § 13. Вольт-амперная характеристика (8 класс)

лампочки

**Цель работы:** построить вольт-амперную характеристику лампочки, оценить температурный коэффициент меди.

#### Теоретическая часть.

В металле в отсутствие электрического поля свободные носители заряда движутся хаотически, участвуя в тепловом движении. При этом они испытывают столкновения как между собой, так и с ионами, находящимися в узлах кристаллической решетки. Когда появляется электрическое поле, заряженные частицы начинают набирать скорость вдоль направления поля, и на фоне хаотического возникает упорядоченное движение — электрический ток. Однако, отдельная частица набирает скорость под действием поля только в промежутке между столкновениями. Непосредственно после столкновения она может двигаться в любом направлении, что означает, что скорость направленного движения после столкновения равна нулю. Поэтому, чем больше столкновений испытывает частица, тем меньше скорость упорядоченного движения.

Сопротивление — физическая величина, характеризующая свойства проводника препятствовать прохождению электрического тока. Поэтому, чем больше столкновений — тем больше сопротивление проводника. При нагревании усиливаются тепловые колебания ионов, образующих кристаллическую решётку. Соответственно, вероятность столкновений свободных зарядов с ионами возрастает, что и приводит к увеличению сопротивления при нагревании металлического проводника.

Эксперимент показывает, что в достаточно большом диапазоне температур удельное сопротивление изменяется пропорционально изменению абсолютной температуры. Эту зависимость принято характеризовать температурным коэффициентом  $\alpha$ :  $\rho = \rho_0(1 + \alpha \cdot (T - T_0))$ , где  $\rho_0$  — значение удельного сопротивления при температуре  $T_0$ , а  $\rho$  — значение удельного сопротивления при температуре  $T$ . Если при нагревании длина и площадь поперечного сечения меняется незначительно, то аналогичную формулу можно записать для сопротивления проводника:  $R = R_0(1 + \alpha \cdot (T - T_0))$ .

Температурные коэффициенты чистых металлов примерно одинаковы и равны  $\alpha \approx 0,0036 \text{ K}^{-1}$ . Температурные коэффициенты сплавов, как правило, значительно меньше, чем у чистых металлов.



Существуют специальные сплавы, сопротивление которых практически не изменяется при нагревании, например, константан и манганин. Сверхпроводимость — свойство некоторых материалов обладать нулевым электрическим сопротивлением при достижении ими температуры ниже определённого значения. У некоторых материалов удельное сопротивление убывает с ростом температуры, их называют полупроводниками: при низкой температуре они ведут себя как диэлектрики, а при высокой — как достаточно хорошие проводники. Уменьшение сопротивления при нагревании говорит о том, что полупроводники обладают иным механизмом электропроводности, чем металлы. И причина этого — различная природа химической связи между атомами металлов и полупроводников.

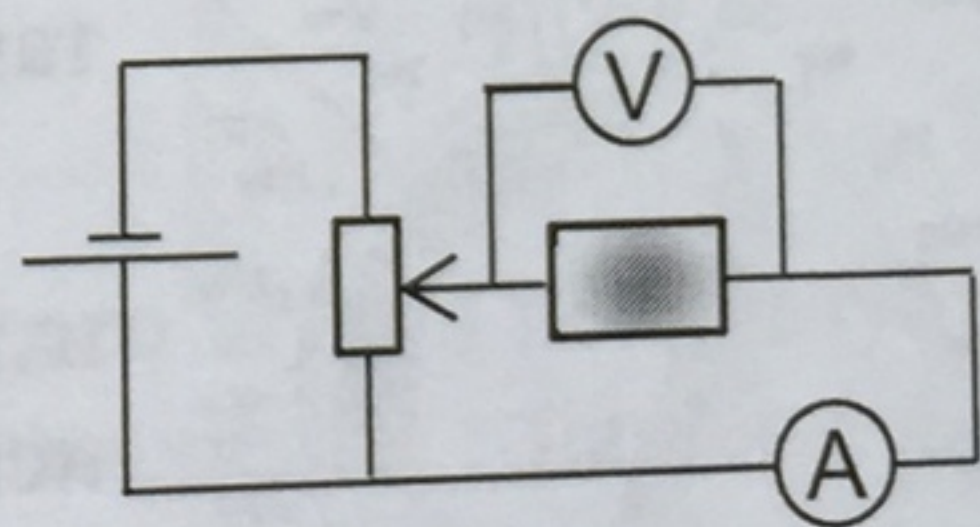
Зависимость сопротивления металлических проводников от температуры используют в различных измерительных и автоматических устройствах, например, в термометрах сопротивления. Главным достоинством таких термометров является большой температурный диапазон измерений. А так же это свойство используется при создании лампы накаливания — искусственного источника света, в котором свет испускает тело накала, нагреваемое электрическим током до высокой температуры.

**Приборы и оборудование:** батарейка, амперметр, вольтметр, соединительные провода, лампочки, реостат, ключ, установка для исследования зависимости сопротивления металла от температуры.

### Экспериментальная часть.

#### Задание 1.

Соберите схему, показанную на рисунке. В качестве исследуемого элемента используйте установку для исследования зависимости сопротивления металла от температуры.



Сдвигая ползунок реостата, установите значение силы тока, текущего через элемент, равным 0,6 А. Используйте более точную шкалу амперметра. Запишите значения силы тока, напряжения и температуры. Нагрейте элемент, используя горячую воду. Запишите новые значения силы тока, напряжения и температуры. По полученным данным оцените температурный коэффициент меди.



### Задание 2.

Проведите серию измерений тока и напряжения для обеих лампочек. Постройте вольт-амперные характеристики. Как изменяется сопротивление нити накаливания от температуры?

## § 14. Сопротивление приборов (мультиметр, 8 класс)

**Цель работы:** исследование зависимости сопротивления проводника от его длины, определение сопротивления амперметра и вольтметра.

### Теоретическая часть.

Зависимость сопротивления проводника от его размеров и вещества, из которого изготовлен проводник, впервые на опытах изучил Ом. Он установил, что сопротивление прямо пропорционально длине проводника, обратно пропорционально площади его поперечного сечения и зависит от вещества проводника:  $R = \rho \frac{l}{S}$ .

Для измерения напряжения и силы тока в электрических цепях используются измерительные приборы, имеющие внутреннее сопротивление. Как правило, их можно считать идеальными, но не всегда. Наличие внутреннего сопротивления приводит к тому, что подключение измерительных приборов к тестируемой цепи влияет на её параметры.



Внутреннее сопротивление прибора можно определить, измерив силу тока и напряжение на нем: по закону Ома  $R = \frac{U}{I}$ . Для этого нужен второй прибор, причем очень точный. В качестве такого прибора можно использовать мультиметр.

Мультиметром называют ручной измерительный прибор, который можно использовать для измерения нескольких величин: напряжение, сила тока, сопротивление и т. д. Большинство мультиметров имеют спереди большую ручку, поворотом которой выбирается режим измерений. Для единиц измерения обычно используют метрические префиксы:  $\mu$  (микро)  $10^{-6}$ ; m (милли)  $10^{-3}$ ; k (кило)  $10^3$ ; M (мега)  $10^6$ .



Режим необходимо выбрать так, чтобы максимальная величина превышала ожидаемое измеряемое значение, но не очень сильно. Предположим, что нужно измерить напряжение батарейки, которое должно быть около 4.5V. На мультиметре есть несколько пределов для измерения постоянного напряжения: 200mV, 2000mV, 20V, 200V, и 1000V. Предел 2000mV слишком мал, так что стоит выбрать следующий: 20V. Все другие диапазоны слишком велики, и если их использовать, то уменьшится точность измерения.

К мультиметру в комплекте прилагаются специальные провода — щупы. У мультиметра есть три отдельных гнезда для щупов, помеченные как 10A, V $\Omega$ mA и COM. Черный щуп всегда включается в гнездо COM — это отрицательный полюс. Красный щуп включается в гнездо V $\Omega$ mA — это положительный полюс. Гнездо 10A используется, только если нужно измерять большие токи (красный щуп).

**Приборы и оборудование:** амперметр, вольтметр, проводник, мультиметр, источник.

### Экспериментальная часть.

#### Задание 1.

Включите мультиметр в режиме сопротивления. Снимите зависимость сопротивления от длины проводника, по графику определите удельное сопротивление вещества. Диаметр проволоки 50 мкм.

#### Задание 2

Включите мультиметр в режиме вольтметра, вместо щупов используйте обычные провода. Соберите схему для измерения тока, текущего через резистор. Измерьте напряжение на амперметре и вычислите его сопротивление.

#### Задание 3

Включите мультиметр в режиме амперметра, вместо щупов используйте обычные провода. Соберите схему для измерения напряжения источника. Измерьте ток, текущий через вольтметр и вычислите его сопротивление.

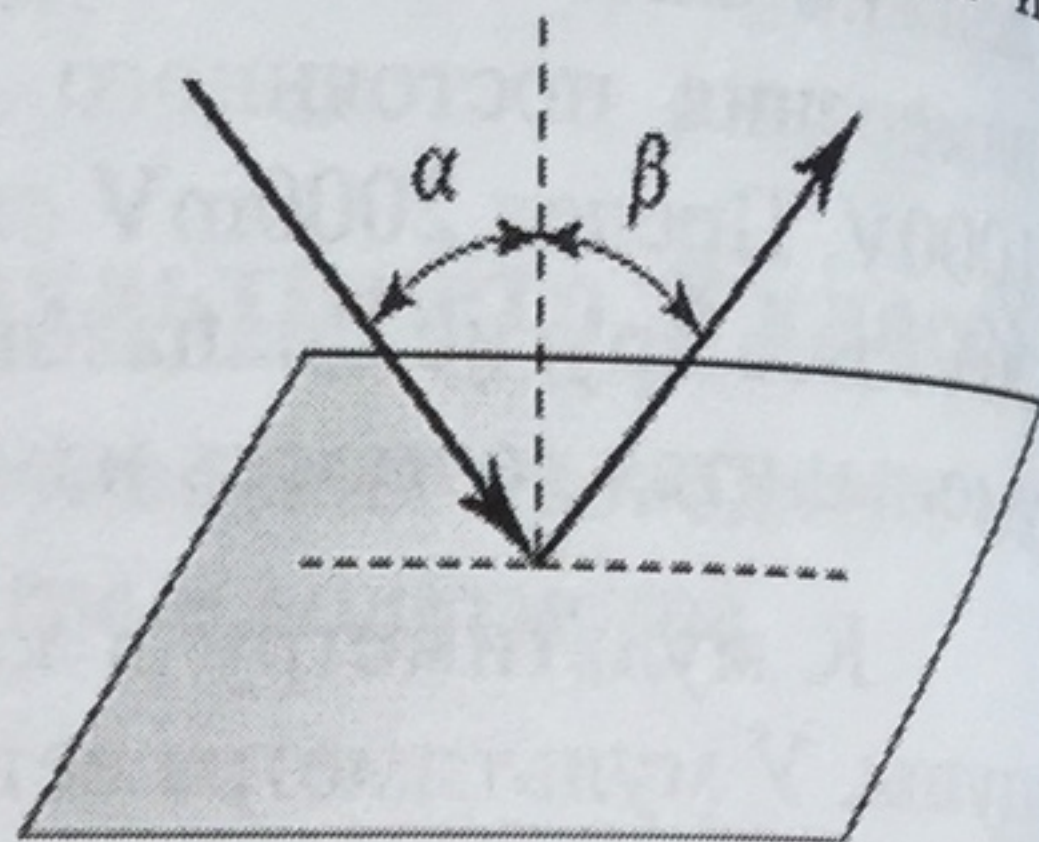
## § 15. Закон отражения (8 класс)

**Цель работы:** проверка закона отражения света и построение изображения в плоском зеркале.



## Теоретическая часть.

Угол между падающим лучом и перпендикуляром к зеркалу называют углом падения луча. А угол между отражённым лучом и перпендикуляром к зеркалу называют углом отражения. Отражённый от зеркала луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром, проведённым в точку падения луча, угол отражения равен углу падения. Причем параллельный пучок лучей и после отражения остаётся параллельным.



Точка и её изображение в плоском зеркале находятся на одной прямой, перпендикулярной зеркалу, и на одинаковых расстояниях от зеркала. А изображение предмета в плоском зеркале находится на таком же расстоянии от зеркала, что и сам предмет, причём размер изображения равен размеру предмета.

Изображение, образованное не самими лучами, а их продолжениями, называют мнимым. Изображение, образованное самими лучами, называют действительным.

**Приборы и оборудование:** лазер, зеркало, предметы (булавки), транспортир.

## Экспериментальная часть.

Указание: все эксперименты проводить, зарисовывая зеркало и ход лучей на специальном листе бумаги. После выполнения работы вклеить лист в тетрадь.

### Задание 1.

Соберите установку для исследования зависимости угла отражения от угла падения. В качестве источника света используйте лазер. Зафиксируйте положение зеркала. Перемещая лазер, зарисуйте положение падающего и отраженного луча. По полученным данным определите угол падения и соответствующий ему угол отражения. Повторите эксперимент несколько раз. Нарисуйте график зависимости угла отражения от угла падения. Определив коэффициент наклона, сделайте вывод, верен ли закон отражения.

### Задание 2.

Чтобы определить положение изображения в зеркале, можно провести следующий эксперимент. Зафиксируем перед зеркалом исследуемый

предмет. Наблюдая его и  
закрыл изображение  
третьим предметом  
на одной линии. Повт  
положение изображения  
расстоянии от предме

## § 16. Закон

Цель работы: про

показателя преломле  
внутреннего отражен

Теоретическая част

Изменение направл

одной прозрачной

преломлением света

и перпендикуляр

преломления.

Закон прелом

лежит в одной п

проведённым в т

преломления:

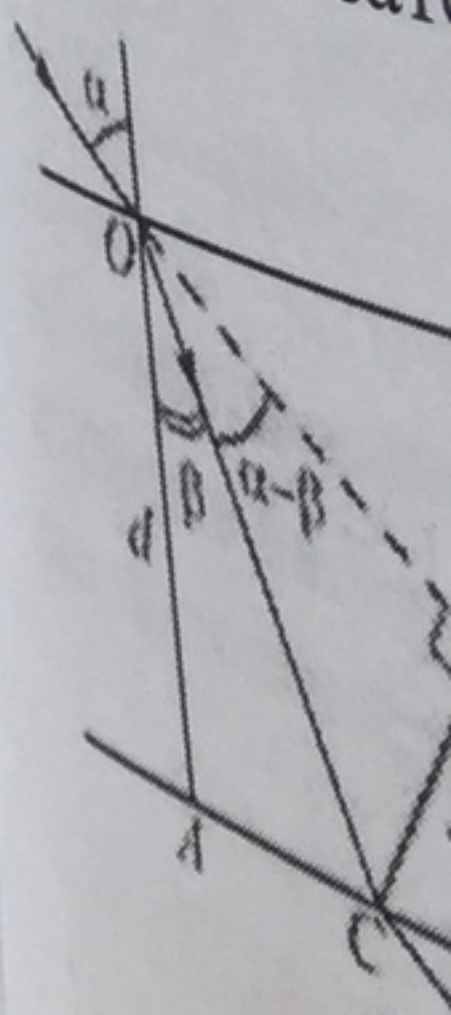
Величина

неизменной хара

равен 1, показате

Пусть

показате





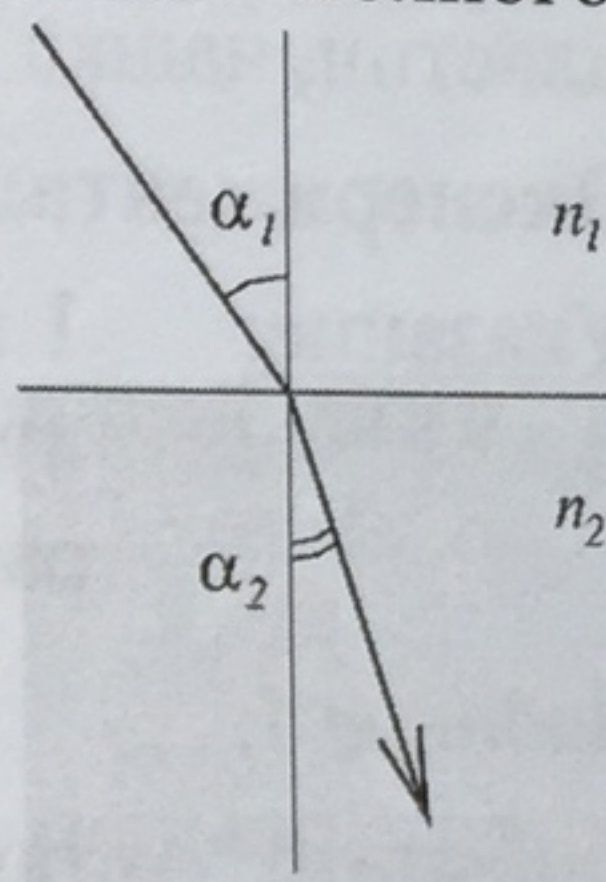
предмет. Наблюдая его изображение, поместим такой же предмет, чтобы он закрыл изображение первого. Не меняя направление взгляда, поместим третий предмет так, чтобы он закрыл второй и изображение первого. Тогда второй, третий и изображение первого предмета окажутся на одной линии. Повторите эксперимент еще два раза. Определите положение изображения предмета в плоском зеркале. Что можно сказать о расстоянии от предмета до зеркала и от зеркала до изображения?

## § 16. Закон преломления (8 класс)

**Цель работы:** проверка закона преломления света, определение показателя преломления воды и стекла, изучение явления полного внутреннего отражения.

### Теоретическая часть.

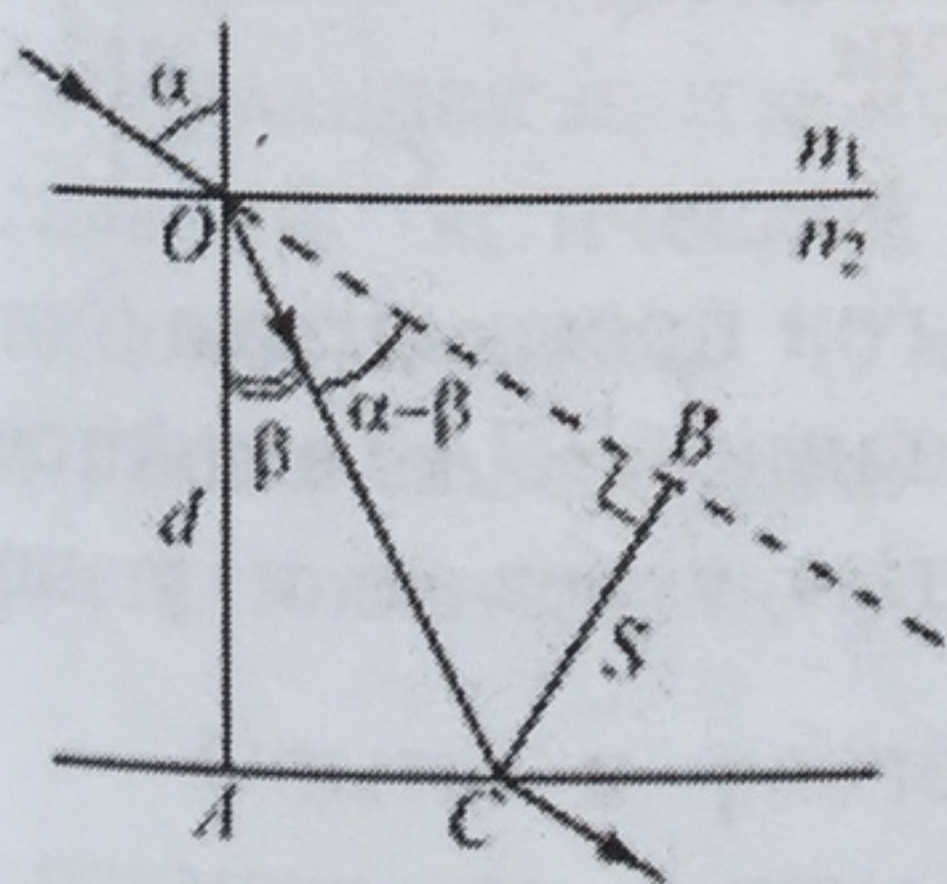
Изменение направления лучей света при переходе из одной прозрачной среды в другую называют преломлением света. Угол между преломленным лучом и перпендикуляром к зеркалу называют углом преломления.



Закон преломления света (закон Снеллиуса): преломлённый луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром, проведённым в точку падения луча, угол падения связан с углом преломления:

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$$

Величина  $n$  называется показателем преломления и является неизменной характеристикой среды. Показатель преломления вакуума равен 1, показатель преломления воздуха  $\approx 1$ .



При прохождении света через плоскопараллельную пластину свет дважды на своем пути претерпевает преломление, в результате чего луч падающий на пластину и луч, выходящий из нее, оказываются параллельными. Смещение луча  $S$  зависит от толщины пластины  $d$ .

Пусть показатель преломления первой среды  $n_1$  больше, чем показатель преломления второй среды  $n_2$ , то есть первая среда более плотная. Тогда по мере увеличения угла падения преломленный луч



будет приближаться к границе раздела двух сред, затем при некотором предельном угле  $\varphi$  пройдет по границе раздела, а при дальнейшем увеличении угла преломленный луч исчезнет. При этом падающий луч будет полностью отражаться границей раздела двух сред – произойдет полное внутреннее отражение.

Рассмотрим полное внутреннее отражение при прохождении луча из стекла в воздух. Предельному углу  $\varphi$  (угол полного внутреннего отражения) соответствует угол преломления  $90^\circ$ .

$$n_1 \sin \varphi = n_2 \sin 90^\circ = n_2 \approx 1 \quad \Rightarrow \quad n_1 = \frac{1}{\sin \varphi}$$

**Приборы и оборудование:** лазерная указка, набор плоскопараллельных пластин, чашка Петри, лимб, стеклянный полуцилиндр.

### Экспериментальная часть.

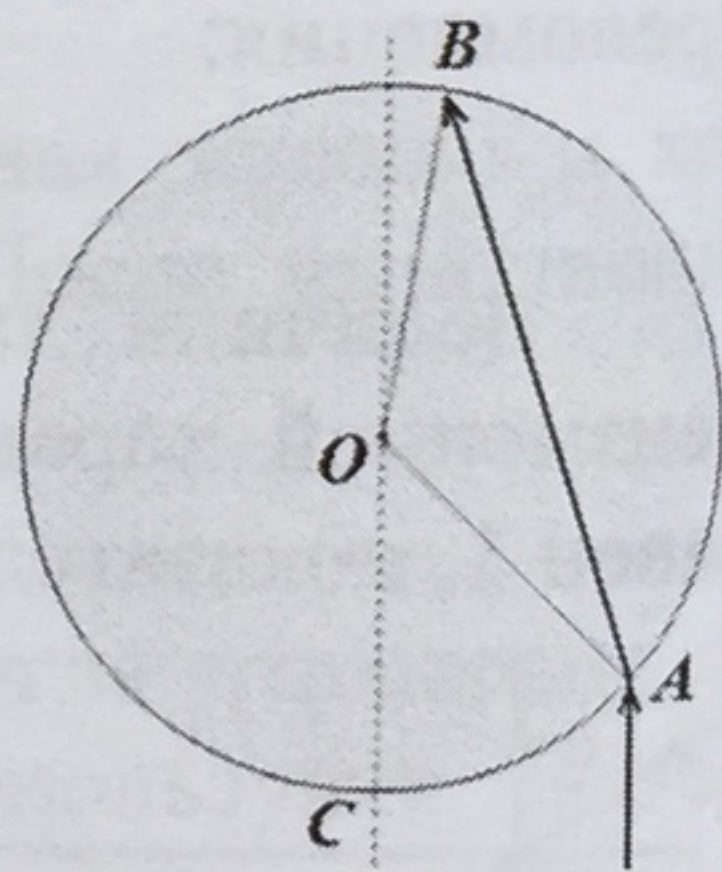
Указание: 1 и 3 эксперименты проводить, зарисовывая призму и ход лучей на специальном листе бумаги. После выполнения работы вклеить лист в тетрадь.

#### Задание 1.

Соберите установку для исследования прохождения света через плоскопараллельную пластину. Определите смещение луча  $S$  для пластины толщиной  $d$ . Повторите эксперимент для двух пластин другой толщины и сделайте вывод о зависимости смещения луча от толщины плоскопараллельной пластины.

#### Задание 2.

Для проверки закона преломления света и определения показателя преломления воды используется цилиндрический сосуд, заполненный водой. Измерения проводятся по лимбу, лучи пускаются параллельно  $OC$ .



Несложно доказать, что угол падения  $\alpha = \angle COA$ , угол преломления  $\beta = \angle OAB$ . Обозначим  $\gamma = \angle COB$ . Так как треугольник  $BOA$  является равнобедренным, то угол  $\beta$  может быть рассчитан через  $\alpha$  и  $\gamma$  по формуле:  $\beta = \frac{180^\circ - (\gamma - \alpha)}{2}$

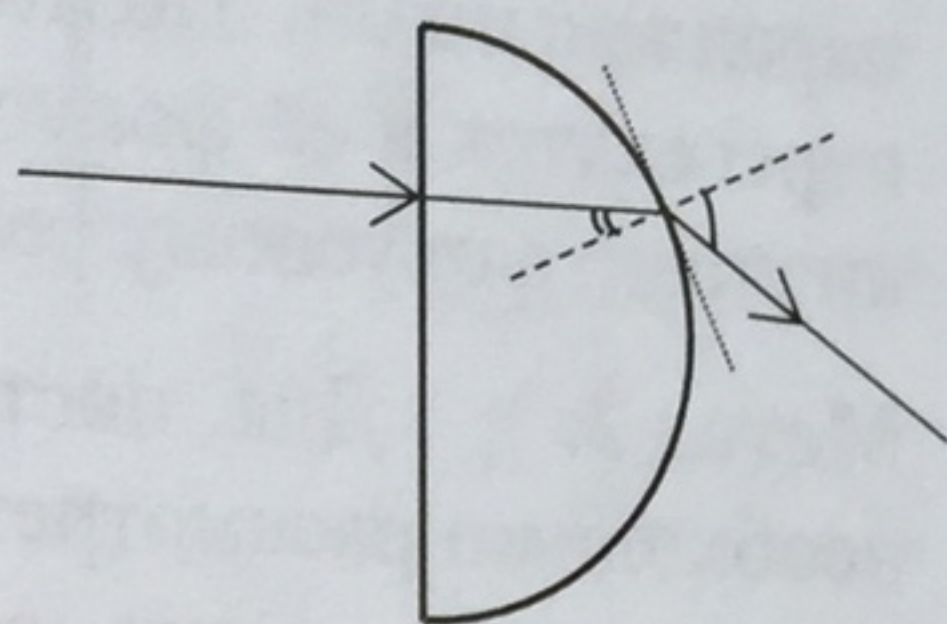
Смещая луч лазера, измерьте зависимость  $\gamma(\alpha)$ . Рассчитайте соответствующие значения  $\beta$  и постройте график зависимости  $\beta(\alpha)$ . В каком диапазоне угол преломления  $\beta$  оказывается прямо пропорциональным углу падения  $\alpha$ ? Постройте график зависимости



$\sin \beta (\sin \alpha)$ . Коэффициент наклона этого графика – величина, обратная показателю преломления воды.

### Задание 3.

Для определения угла полного внутреннего отражения и показателя преломления стекла используется полуцилиндр. Если пустить луч лазера перпендикулярно плоской поверхности полуцилиндра, то на первой границе сред преломления происходить не будет. Смещая луч параллельно, определите предельный угол  $\varphi$  и рассчитайте показатель преломления стекла.



## § 17. Собирающая линза (8 класс)

**Цель работы:** определить фокусное расстояние собирающей линзы и проверить формулу тонкой линзы.

### Теоретическая часть.

Тонкая линза – линза, у которой толщина намного меньше других размеров. Для таких линз можно считать, что она вся находится в одной плоскости – плоскости линзы. Если направить на линзу луч света так, чтобы он прошёл через её центр, то луч не изменит своего направления.

Линзы по форме бывают двух видов: выпуклые и вогнутые. Если направить на выпуклую линзу параллельный пучок света, то после преломления он станет сходящимся. Поэтому такую линзу называют собирающей. Если же направить параллельный пучок света на вогнутую линзу, то после преломления он разойдётся. Поэтому такую линзу называют рассеивающей. Точку, в которой после преломления в собирающей линзе пересекаются лучи, падающие на линзу параллельно главной оптической оси, называют фокусом линзы. Расстояние от плоскости линзы до её фокуса называют фокусным расстоянием линзы и обозначают буквой  $F$ . У каждой собирающей линзы есть два фокуса, расположенные по разные стороны от нее на равных расстояниях.

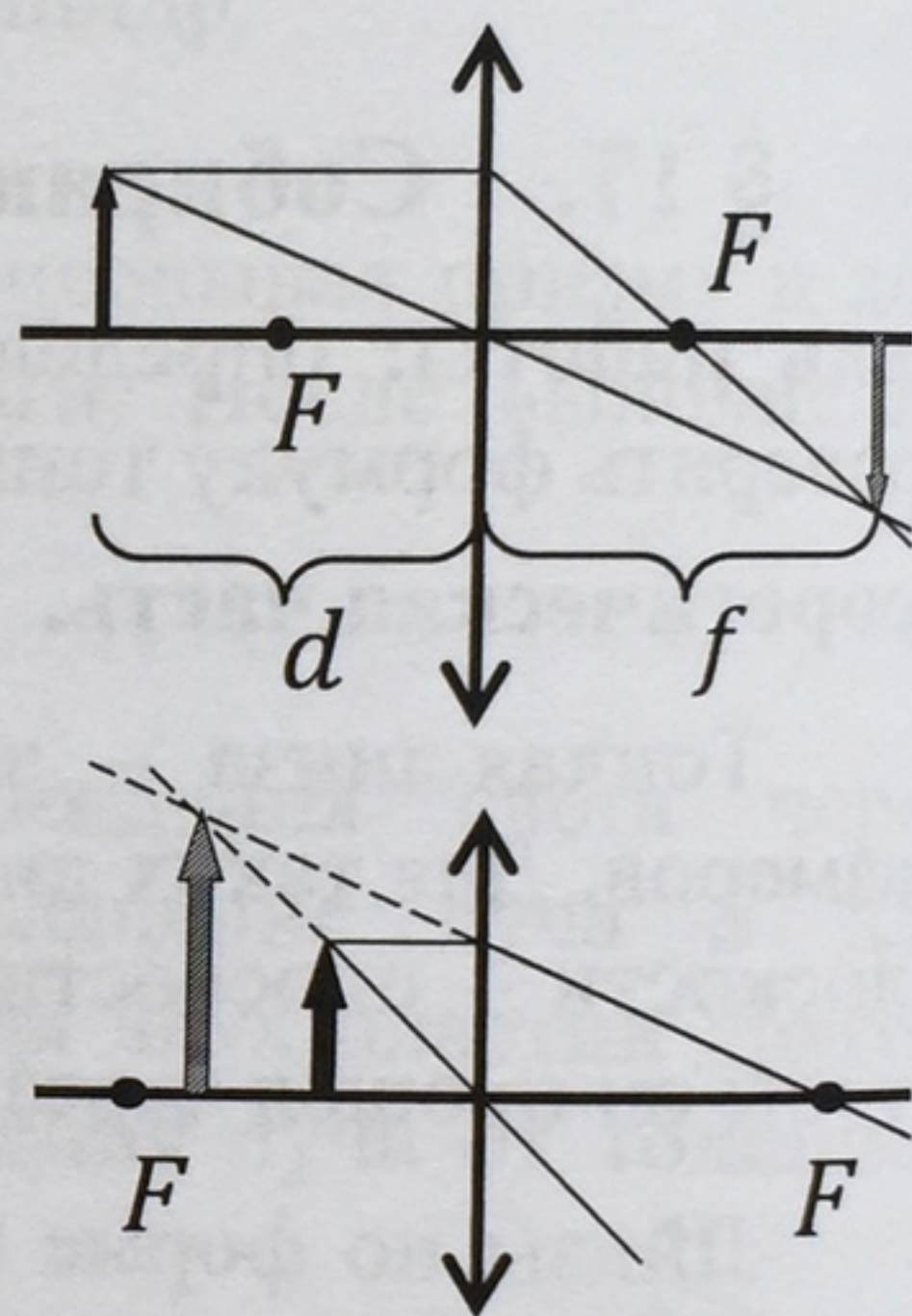
Опыты и расчёты показывают, что между расстоянием  $d$  от предмета до линзы, расстоянием  $f$  от линзы до изображения и фокусным расстоянием линзы  $F$  существует соотношение, которое называют формулой тонкой линзы:  $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$ . В этой формуле расстояние до изображения берут со знаком «плюс», если изображение



действительное, и со знаком «минус», если изображение мнимое. Фокусное расстояние собирающей линзы берут со знаком «плюс», а рассеивающей — со знаком «минус».

**Метод 1.** Исходящие от Солнца лучи можно считать практически параллельными. Поэтому после преломления в линзе солнечные лучи пересекутся в её фокусе. Расстояние от собирающей линзы до этой точки равно фокусному расстоянию линзы.

**Метод 2.** Для построения изображения предмета в тонкой линзе необходимо рассмотреть два луча. Пусть первый из них проходит через центр линзы, тогда он не будет преломляться. Вторым луч пусть параллельно главной оптической оси, тогда после преломления он пройдет через фокус линзы. На пересечении этих лучей и будет находиться изображение предмета. Проведем такие построения для двух положений предмета:  $d > F$  и  $d < F$ . Заметим, что в первом случае изображение будет действительным и перевернутым, а во втором случае мнимым и прямым. А значит, если двигать предмет от линзы, то в момент прохождения фокуса изображение перестанет быть прямым — оно перевернется. Мнимое изображение невозможно обнаружить на экране, зато можно увидеть глазами.



**Метод 3.** Для проверки формулы тонкой линзы необходимо снять зависимость расстояния  $f$  (от линзы до изображения) от расстояния  $d$  (от предмета до линзы). Зависимость  $f(d)$  не является линейной, проводится линеаризация:  $\frac{1}{f} = -\frac{1}{d} + \frac{1}{F}$ . Обозначим  $y = \frac{1}{f}$ ,  $x = \frac{1}{d}$ ,  $A = \frac{1}{F}$ . Получаем линейную зависимость  $y = -x + A$ . Построив график зависимости  $y(x)$ , можно проверить формулу тонкой линзы: график должен представлять линейную зависимость с коэффициентом наклона  $-1$ . Фокус линзы вычисляется по формуле  $F = \frac{1}{A}$ .

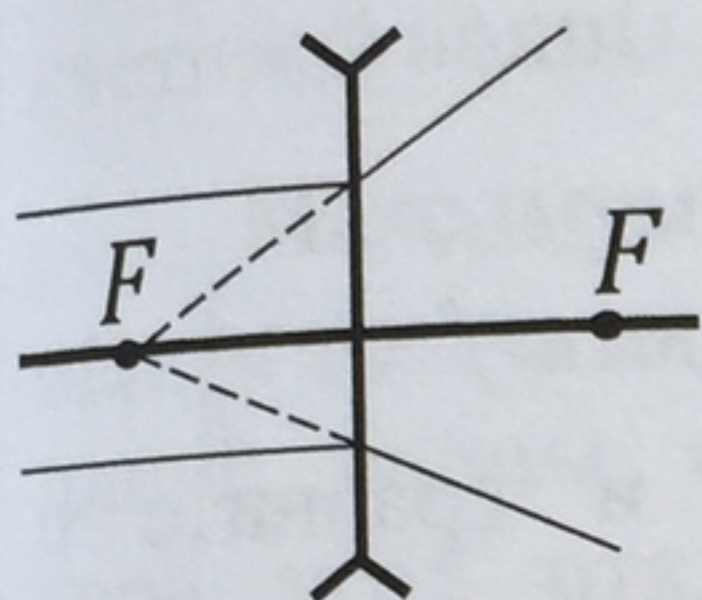
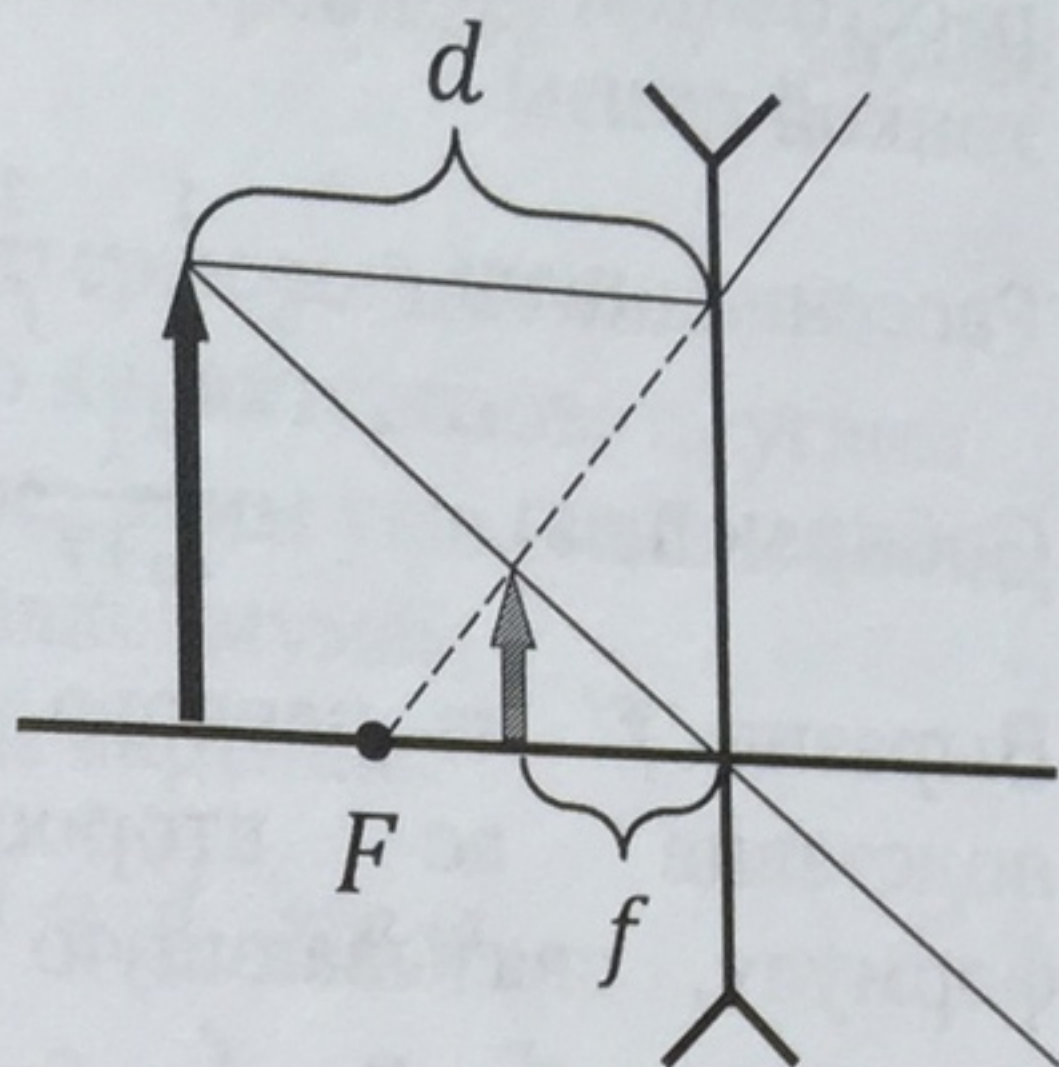
## § 18. Рассеивающая линза (8 класс)

**Цель работы:** определить фокусное расстояние рассеивающей линзы.



## Теоретическая часть.

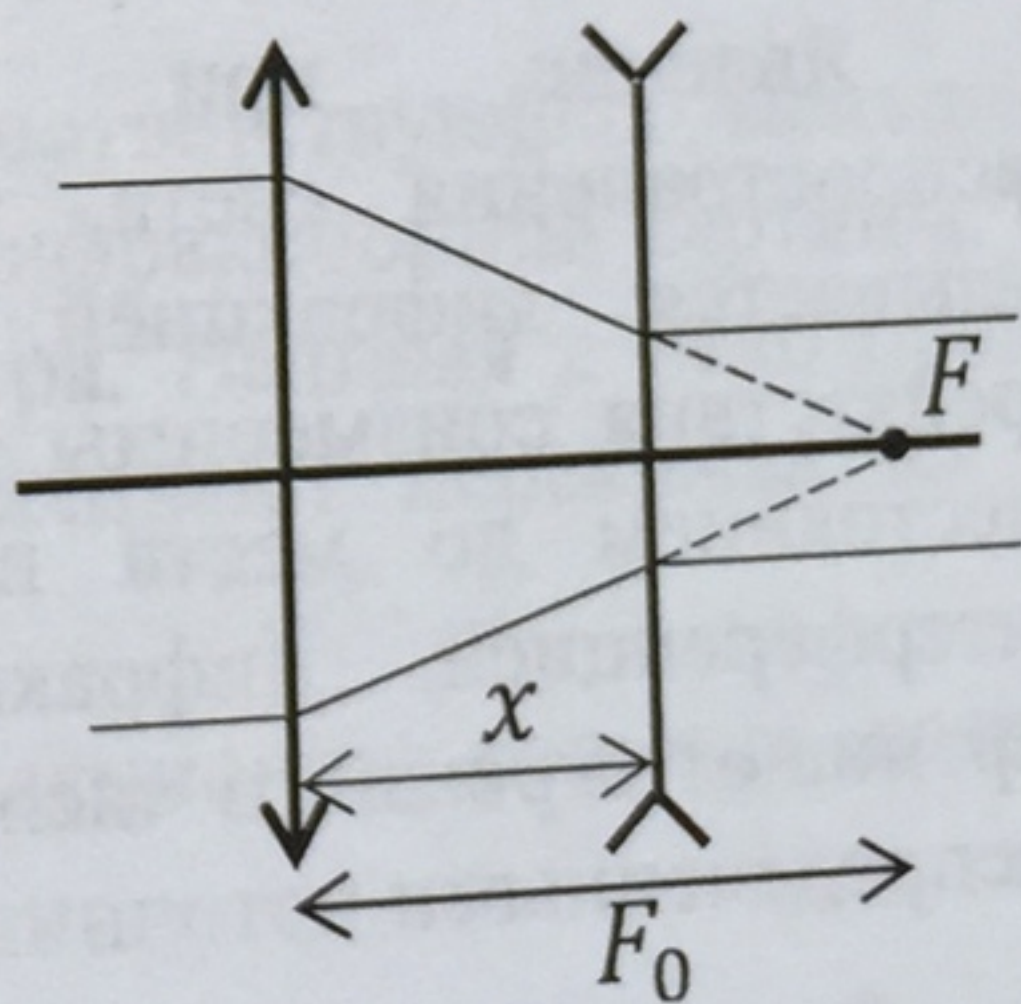
Для построения изображения предмета в тонкой линзе необходимо рассмотреть два луча. Пусть первый из них проходит через центр линзы, тогда он не будет преломляться. Второй луч пустим параллельно главной оптической оси, тогда после преломления он пройдет через передний фокус линзы. На пересечении этих лучей и будет находиться изображение предмета.



После преломления в рассеивающей линзе параллельные лучи расходятся, а продолжения лучей пересекаются в фокусе линзы. Формула тонкой рассеивающей линзы:  $\frac{1}{d} - \frac{1}{f} = -\frac{1}{F}$ .

Определение фокусного расстояния отрицательной линзы затрудняется тем, что изображение предмета всегда получается мнимым (лучи расходятся), и поэтому расстояние до него не может быть непосредственно измерено. Эту трудность можно обойти с помощью вспомогательной положительной линзы с известным фокусным расстоянием  $F_0$ .

**Метод 1.** Для упрощения измерений пустим на собирающую линзу с известным фокусным расстоянием  $F_0$  пучок параллельных лучей. После преломления в линзе лучи пересекутся в её фокусе. Поставим рассеивающую линзу так, чтобы ее фокус совпал с фокусом собирающей линзы. Тогда источник падающих на линзу лучей находится в ее фокусе — из рассеивающей линзы выйдут параллельные лучи. Зная положение фокуса собирающей линзы, нетрудно определить фокусное расстояние рассеивающей линзы:  $F = F_0 - x$



**Метод 2.** Для определения фокусного расстояния рассеивающей линзы можно снять зависимость расстояния  $f$  (от линзы до изображения) от расстояния  $d$  (от предмета до линзы). Для получения действительного изображения поставим собирающую линзу на

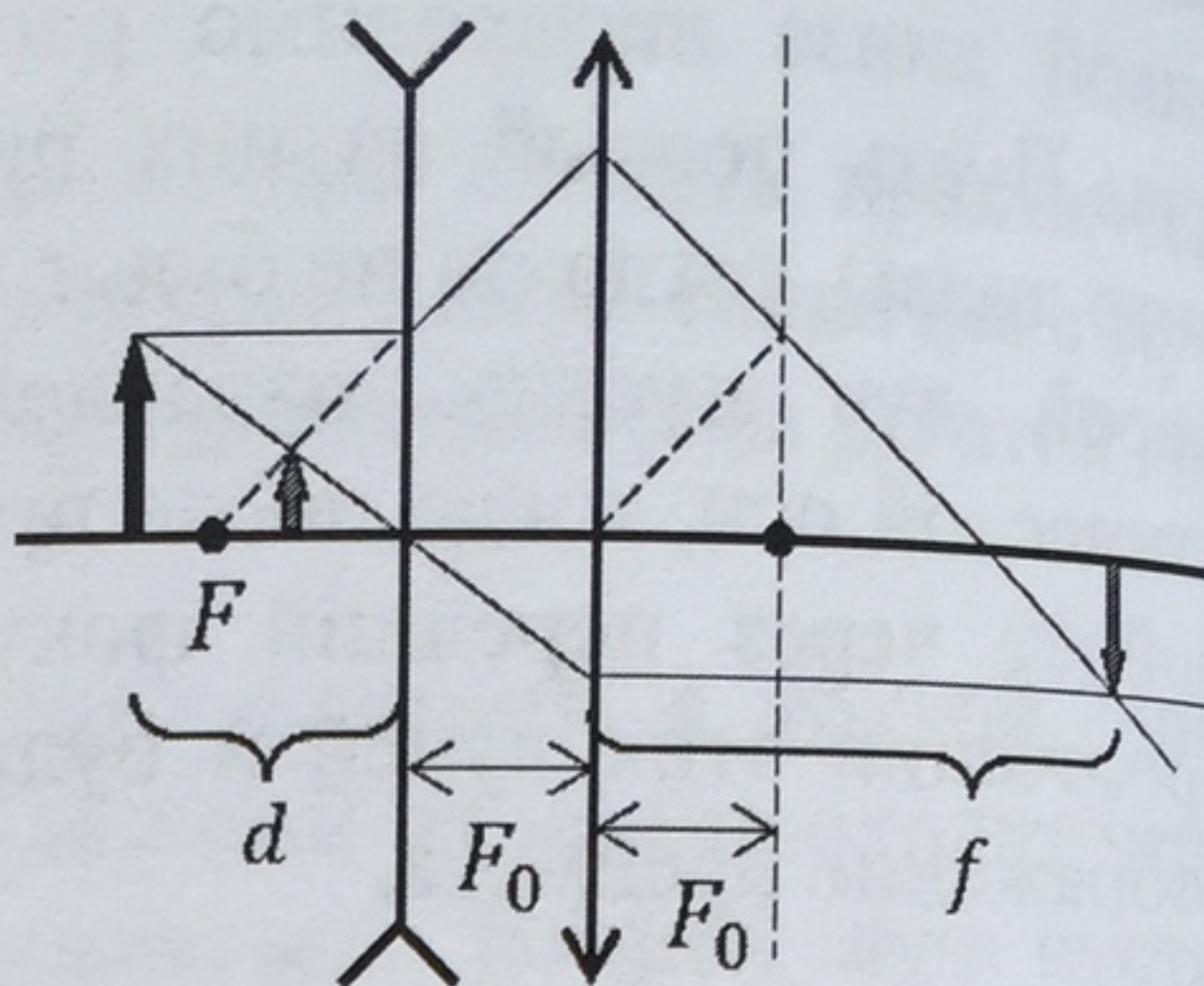


расстоянии, равному ее фокусному расстоянию. Запишем формулу тонкой линзы.

Рассеивающая:  $\frac{1}{d} - \frac{1}{f'} = -\frac{1}{F}$

Собирающая:  $\frac{1}{F_0 + f'} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F_0}$

Выразив  $f'$  из первого уравнения и подставив во второе, получим формулу, связывающую измеряемые величины  $d$  и  $f$  с фокусными расстояниями  $F$  и  $F_0$ . При построении графика необходимо провести линеаризацию.



Указание: упростите выражение и получите зависимость  $f$  от  $\frac{1}{d}$ . По графику зависимости определите  $F$ ,  $F_0$  и сравните с полученными данными в методе 1.

## § 19. Дифракционная решетка (8 класс)

**Цель работы:** определение длины волны лазерной указки, оценка периода дифракционной решетки.

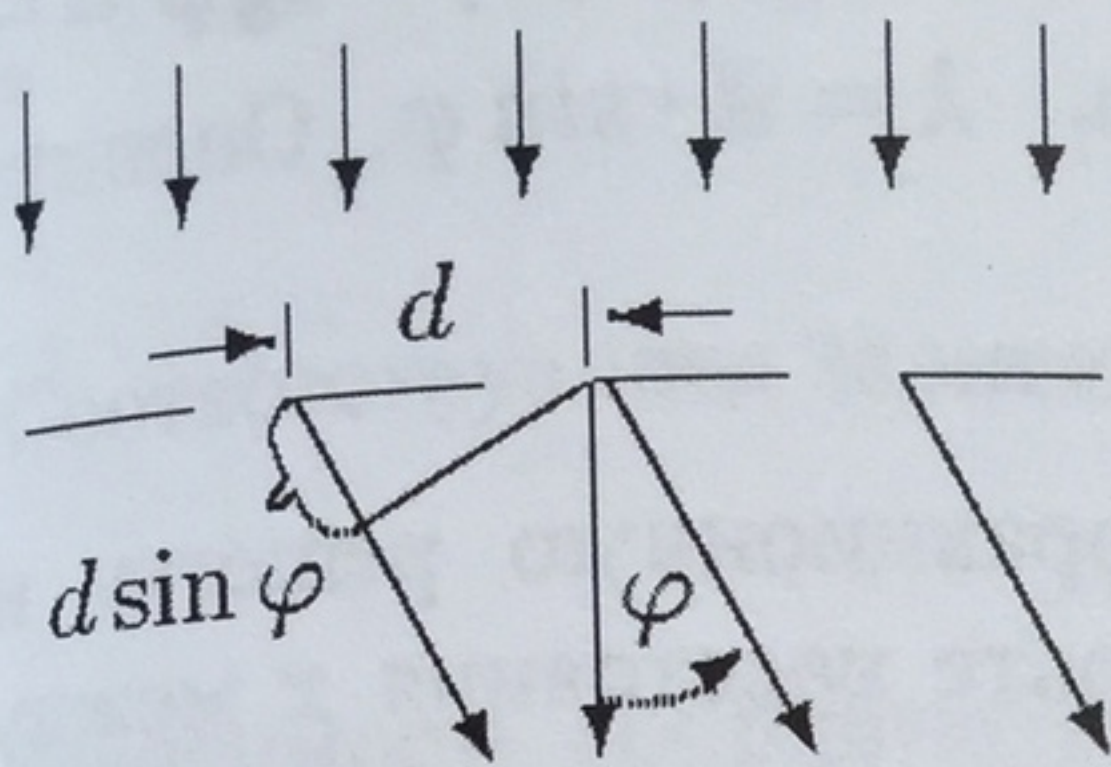
### Теоретическая часть.

Явление, при котором нарушается прямолинейность распространения света, т.е. световая волна, огибает препятствия, называется дифракцией. Дифракция наблюдается, если размеры препятствия соизмеримы с длиной волны или малы по сравнению с расстоянием до места наблюдения. Это явление тесно связано с интерференцией. Дифракционная картина есть интерференционная картина от огромного числа волн, испущенных практически непрерывно распределенными источниками.

Различают отражательные и прозрачные дифракционные решетки. У отражательных штрихи наносятся на зеркальную (обычно металлическую) поверхность и наблюдение ведётся в отражённом свете. Плоская прозрачная дифракционная решетка представляет собой стеклянную полированную пластину, на которую алмазным резцом при помощи специальной машины нанесены параллельные штрихи, расположенные на одинаковых расстояниях друг от друга. Наиболее



наглядно описание действия дифракционной решетки в случае прозрачной решетки.

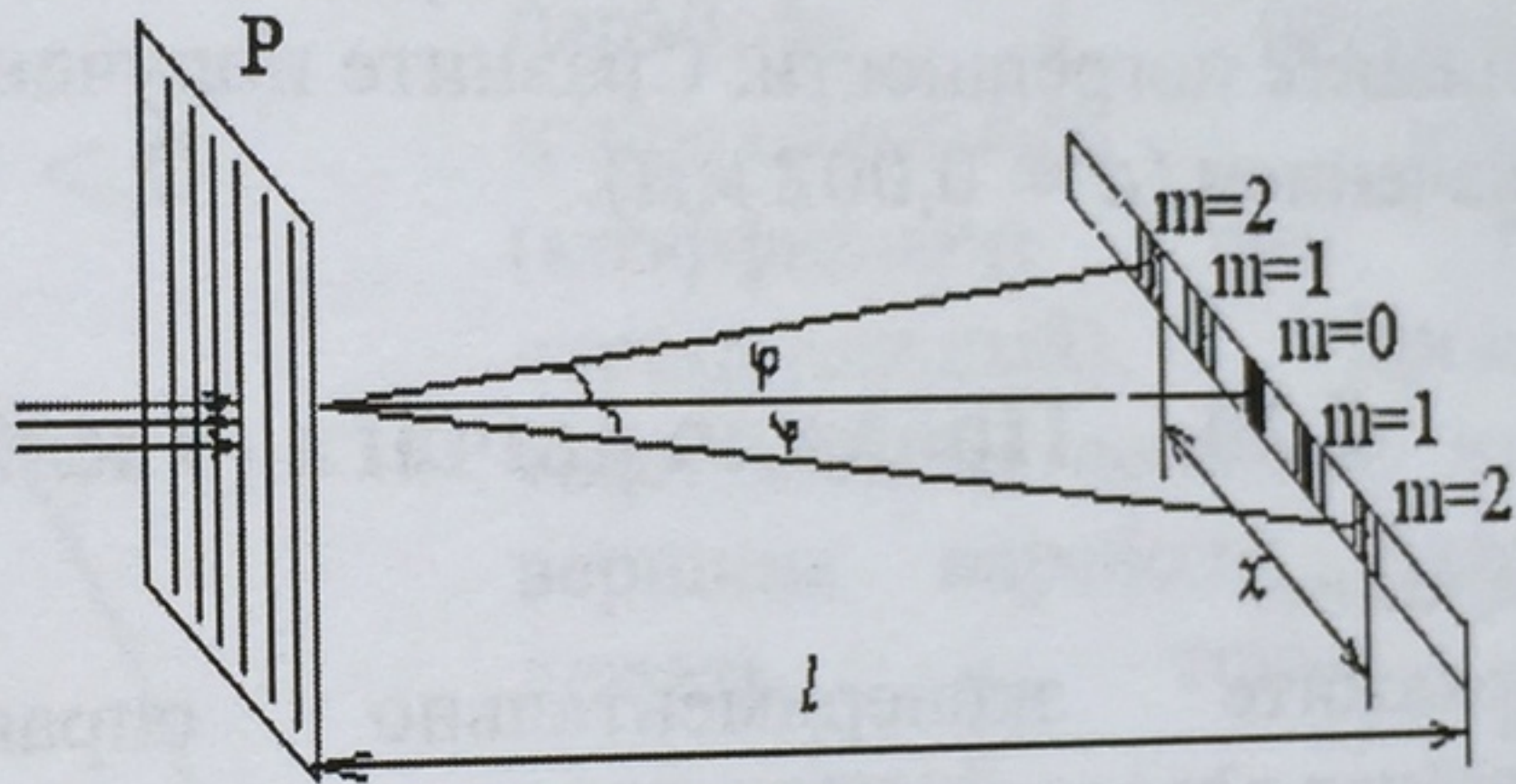


Положение интерференционных максимумов удобно характеризовать углом наблюдения  $\varphi$ . Определим углы наблюдения, соответствующие максимумам интерференционной картины:

$$m \cdot \lambda = d \cdot \sin \varphi$$

где  $(m = 0, 1, 2, \dots)$  – порядок дифракционного максимума,  $\lambda$  – длина световой волны,  $d$  – период решетки.

Максимум нулевого порядка для всех длин волн наблюдается в одном месте: непосредственно в направлении первичного пучка. Каждой длине волны соответствует свой угол отклонения, что позволяет использовать дифракционную решетку в качестве спектрального прибора для определения длины волны. Значениям  $m = 1$  соответствуют два симметрично расположенных спектра первого порядка.



В спектре данного порядка линия, соответствующая меньшей длине волны, располагается ближе к центру дифракционной картины. С ростом  $m$  увеличивается растянутость спектра. Начиная с некоторого значения  $m$ , спектры соседних порядков начинают перекрываться – дифракционная картина смазывается.

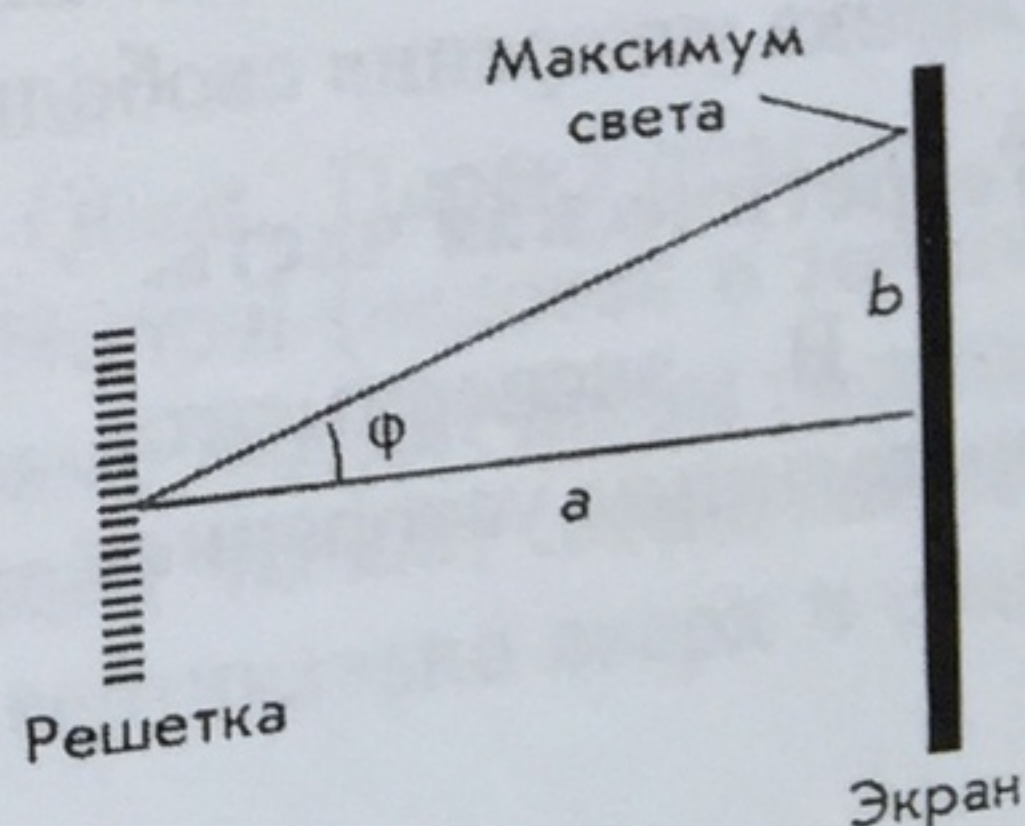
**Приборы и оборудование:** прозрачная дифракционная решетка, лазер, лампочка, линейка.

**Экспериментальная часть:**

$$d = 0,002 \text{ мм.}$$

**Задание 1.**

Посветите на дифракционную решетку лазером. Измерьте с помощью миллиметровой шкалы на экране расстояние  $x$  между максимумами первого порядка. Запишите отклонение луча после прохождения дифракционной решетки:





$b = \frac{x}{2}$ . Измерьте расстояние от дифракционной решетки до экрана  $a$  и рассчитайте угол наблюдения  $\varphi$ , используя формулу  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{a}$ . Рассчитайте длину волны лазера по формуле:  $\lambda = d \cdot \sin \varphi$ . Оцените погрешности.

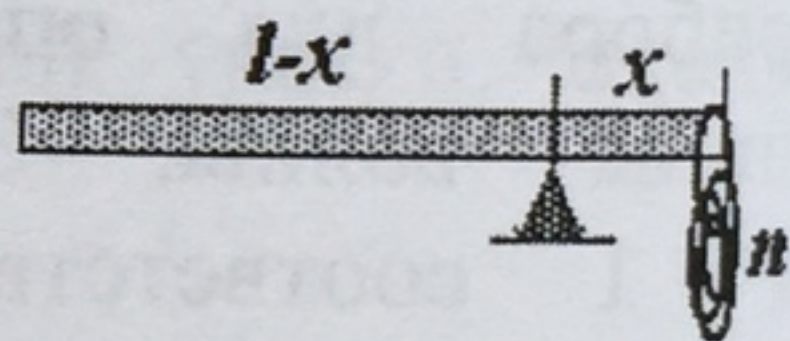
### Задание 2.

Пропустите белый свет лампочки через дифракционную решетку и зарисуйте полученный спектр в тетрадь. Измерьте расстояния  $x$  между серединами полос основных семи цветов в спектре первого порядка. Запишите отклонение луча для этих цветов:  $b = \frac{x}{2}$ . Измерьте расстояние от дифракционной решетки до экрана  $a$  и рассчитайте угол наблюдения  $\varphi$ , используя формулу  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{a}$ . Постройте линеаризованный график зависимости  $\lambda = d \cdot \sin \varphi$ . Определите период дифракционной решетки. Оцените погрешности. Сравните полученный результат с теоретическим значением ( $d = 0,002$  мм).

## § 20. Правило рычага (9 класс)

### Задание.

Докажите экспериментально справедливость законов равновесия рычага.



1. Снимите зависимость длина плеча рычага  $x$ , к которому прикрепляются скрепки, от числа скрепок  $n$ .
2. Постройте график зависимости  $\frac{1}{x}(n)$ .
3. По графику определите отношение масс линейки и скрепки  $\frac{M}{m}$ .

**Приборы и оборудование:** линейка, канцелярские скрепки.

## § 21. Равноускоренное движение (9 класс)

**Цель работы:** изучение движения с постоянным ускорением: анализ графиков зависимости координаты, скорости и ускорения от времени. Оценка ускорения свободного падения.

### Теоретическая часть.

В эксперименте исследуется прямолинейное движение с постоянным ускорением – ускорением свободного падения  $\vec{g}$ . Движение



происходит вдоль оси  $y$ , направленной вертикально вверх. Закон движения в общем виде выглядит следующим образом:

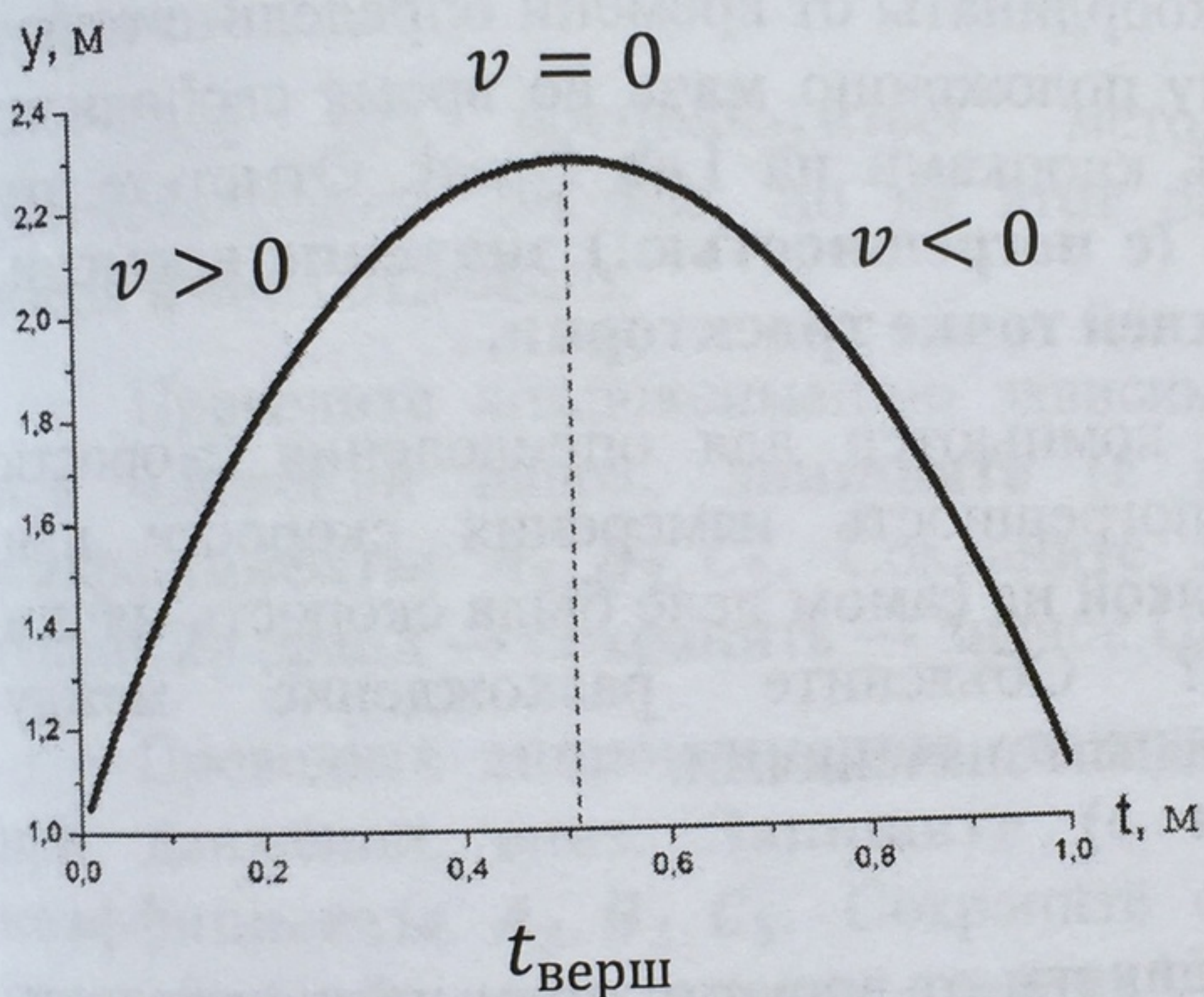
$$\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 \cdot t + \frac{\vec{g} \cdot t^2}{2}$$

Соответствующая зависимость скорости от времени имеет вид:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g} \cdot t$$

Зависимость координаты от времени в проекции на ось  $OY$  описывается законом:

$$y(t) = y_0 + v_0 \cdot t - \frac{g \cdot t^2}{2}.$$



Нетрудно увидеть, что графиком будет являться парабола с ветвями, направленными вниз (коэффициент при  $t^2$  отрицательный). Кроме того, можно показать, что вершина параболы будет лежать в точке с координатой  $t_{\text{верш}} = \frac{v_0}{g}$ .

Исходя из  $v = v_0 - g \cdot t$ , скорость в этой точке равна нулю.

**Приборы и оборудование:** датчик расстояния, мяч, Lab Quest.

В данном эксперименте для сбора данных о координате, скорости и ускорении мяча, подброшенного вертикально вверх, будет использоваться датчик расстояния. Ставьте эксперимент аккуратно, датчик имеет малый диапазон видимости.

### Экспериментальная часть.

#### Задание 1.

Подключите датчик расстояния к Lab Quest. Переключатель на датчике расстояния установите в положение Normal (человек и мячик). Расположите датчик на стуле. Держите мяч прямо над датчиком расстояния. Начните сбор данных. Датчик расстояния начнёт пощёлкивать. Подождите 1 секунду, затем подбросьте мяч вертикально вверх и сразу



же уберите руки. Желательно подбросить мяч на 0,5 м над датчиком расстояния. Поймайте мяч и задержите его. Это может потребовать некоторой тренировки ☺

Изучите график зависимости координаты от времени. Повторите предыдущий пункт, если на графике зависимости координаты от времени не отображается парабола. Проконсультируйтесь у учителя, если вы не уверены, следует ли повторить сбор данных.

На графике зависимости координаты от времени выделите участок, на котором мяч находился в свободном падении. Увеличьте масштаб этого участка (выделите участок → график → увеличить). Масштаб на втором графике изменится автоматически.

На графике зависимости координаты от времени определите точку, которая соответствует высшему положению мяча во время свободного полёта. Курсор можно двигать кнопками на Lab Quest. Отметьте эту точку на графике и **запишите (с погрешностью!) значение времени, координаты и скорости в верхней точке траектории.**

Какой метод использует компьютер для определения скорости тела? Как можно оценить погрешность измерения скорости при использовании этого метода? Какой на самом деле была скорость мяча в верхней точке траектории? Объясните расхождение между теоретическим и экспериментальным значениями.

#### Задание 2.

График зависимости координаты от времени должен представлять собой параболу. Аппроксимируйте график квадратичной зависимостью (выделите участок → анализ → подбор кривой → положение → квадратичная → ОК). Lab Quest автоматически проведет подбор коэффициентов в уравнении  $y(x) = Ax^2 + Bx + C$ , где  $y$  – координата, а  $x$  – время.

**Запишите (с погрешностью!) полученные коэффициенты  $A, B, C$ .** Для просмотра коэффициентов нажмите на окошко «положение» в правой части экрана.

График зависимости скорости от времени должен представлять собой прямую. Аппроксимируйте график линейной зависимостью (выделите участок → анализ → подбор кривой → скорость → линейная → ОК). Lab Quest автоматически проведет подбор коэффициентов в уравнении  $y(x) = mx + b$ , где  $y$  – скорость, а  $x$  – время.

Запишите (с погрешностью!) полученные коэффициенты  $A, B, C$ . Для просмотра коэффициентов нажмите на окошко «положение» в правой части экрана.

Сохраните файл → сохранить → значок дискеты

Чему соответствует полученное из первого задания значение  $g$  на графике зависимости координаты от времени свободного падения? Сравните рассчитанные значения  $g$  с теоретическим значением  $g = 9,815 \text{ м/с}^2$ .

Задание 3.

Ещё раз проведите эксперимент. Запишите значение  $g$  на графике зависимости координаты от времени свободного падения. Сравните рассчитанные значения  $g$  с теоретическим значением  $g = 9,815 \text{ м/с}^2$ .

Проведите эксперимент. Запишите значение  $g$  на графике зависимости координаты от времени свободного падения. Сравните рассчитанные значения  $g$  с теоретическим значением  $g = 9,815 \text{ м/с}^2$ .

Проведите эксперимент. Запишите значение  $g$  на графике зависимости координаты от времени свободного падения. Сравните рассчитанные значения  $g$  с теоретическим значением  $g = 9,815 \text{ м/с}^2$ .

Проведите эксперимент. Запишите значение  $g$  на графике зависимости координаты от времени свободного падения. Сравните рассчитанные значения  $g$  с теоретическим значением  $g = 9,815 \text{ м/с}^2$ .

Проведите эксперимент. Запишите значение  $g$  на графике зависимости координаты от времени свободного падения. Сравните рассчитанные значения  $g$  с теоретическим значением  $g = 9,815 \text{ м/с}^2$ .

Проведите эксперимент. Запишите значение  $g$  на графике зависимости координаты от времени свободного падения. Сравните рассчитанные значения  $g$  с теоретическим значением  $g = 9,815 \text{ м/с}^2$ .

Проведите эксперимент. Запишите значение  $g$  на графике зависимости координаты от времени свободного падения. Сравните рассчитанные значения  $g$  с теоретическим значением  $g = 9,815 \text{ м/с}^2$ .

Проведите эксперимент. Запишите значение  $g$  на графике зависимости координаты от времени свободного падения. Сравните рассчитанные значения  $g$  с теоретическим значением  $g = 9,815 \text{ м/с}^2$ .

Проведите эксперимент. Запишите значение  $g$  на графике зависимости координаты от времени свободного падения. Сравните рассчитанные значения  $g$  с теоретическим значением  $g = 9,815 \text{ м/с}^2$ .

Проведите эксперимент. Запишите значение  $g$  на графике зависимости координаты от времени свободного падения. Сравните рассчитанные значения  $g$  с теоретическим значением  $g = 9,815 \text{ м/с}^2$ .

Проведите эксперимент. Запишите значение  $g$  на графике зависимости координаты от времени свободного падения. Сравните рассчитанные значения  $g$  с теоретическим значением  $g = 9,815 \text{ м/с}^2$ .

Проведите эксперимент. Запишите значение  $g$  на графике зависимости координаты от времени свободного падения. Сравните рассчитанные значения  $g$  с теоретическим значением  $g = 9,815 \text{ м/с}^2$ .

Проведите эксперимент. Запишите значение  $g$  на графике зависимости координаты от времени свободного падения. Сравните рассчитанные значения  $g$  с теоретическим значением  $g = 9,815 \text{ м/с}^2$ .

Проведите эксперимент. Запишите значение  $g$  на графике зависимости координаты от времени свободного падения. Сравните рассчитанные значения  $g$  с теоретическим значением  $g = 9,815 \text{ м/с}^2$ .



**Запишите (с погрешностью!) полученные коэффициенты  $m, b$ .** Для просмотра коэффициентов нажмите на окошко «скорость» в правой части экрана.

Сохраните файл на флешку под названием «uam 9e ivanov 1» (файл → сохранить → значок USB).

Чему соответствует коэффициент при  $t^2$  на графике зависимости координаты от времени? Чему равно ускорение свободного падения  $g$ , полученное из первого графика? Чему соответствует коэффициент при  $t$  на графике зависимости скорости от времени? Чему равно ускорение свободного падения  $g$ , полученное из второго графика? Сравните рассчитанные значения  $g$  для параболы и для прямой.

### Задание 3.

Ещё раз воспользуйтесь методикой подбора кривой и статистического анализа, но на этот раз проанализируйте движение вверх и вниз отдельно.

Проведите аппроксимацию зависимости координаты от времени при движении вверх. **Запишите (с погрешностью!) полученные коэффициенты  $A_2, B_2, C_2$ .** Сохраните файл под названием «uam 9e ivanov 2» (файл → сохранить → значок USB).

Проведите аппроксимацию зависимости координаты от времени при движении вниз. **Запишите (с погрешностью!) полученные коэффициенты  $A_3, B_3, C_3$ .** Сохраните файл под названием «uam 9e ivanov 3» (файл → сохранить → значок USB).

Чем различаются подобранные кривые для движения вверх и движения вниз? Чему равно ускорение свободного падения  $g$  в каждом из этих случаев? Сравните рассчитанные значения  $g$  для параболы (задание 2), движения вверх, движения вниз и теоретическое значение  $g = 9,815 \text{ м/с}^2$ .

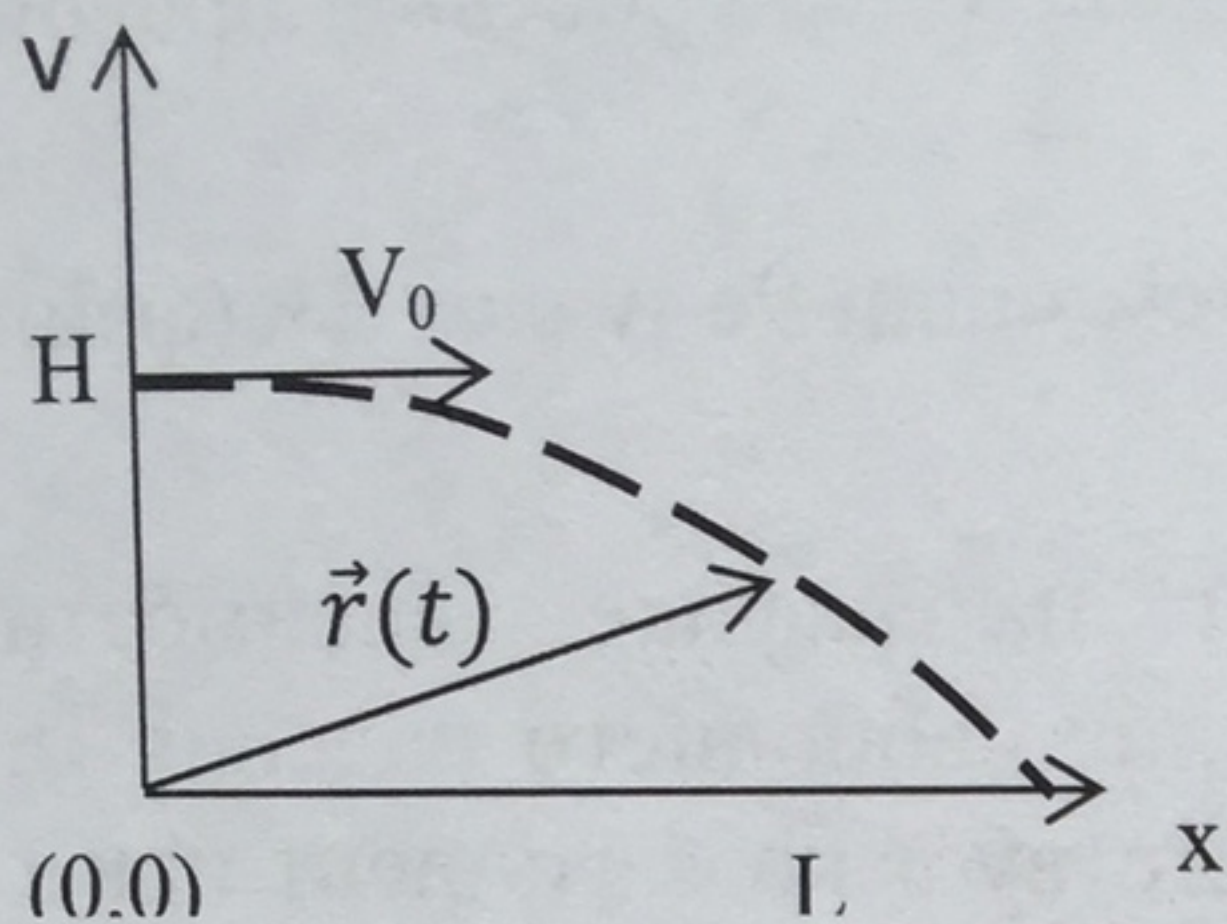
## § 22. Под углом к горизонту (9 класс)

**Цель работы:** исследование движение тела в поле силы тяжести Земли.

### Теоретическая часть.

Закон движения, описывающий равнопеременное движение, выглядит следующим образом:  $\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 \cdot t + \frac{\vec{g} \cdot t^2}{2}$





Движение происходит вдоль осей  $x$  и  $y$ , начальная скорость тела  $\vec{v}_0$  направлена горизонтально. Начальные координаты тела  $(x_0, y_0) = (0, H)$ . Тогда закон движения в проекции на оси координат будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} x(t) = v_0 \cdot t \\ y(t) = H - \frac{g \cdot t^2}{2} \end{cases}$$

Обозначим длину полета  $L$ , в момент приземления система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} L = v_0 \cdot t \\ 0 = H - \frac{g \cdot t^2}{2} \end{cases}$$

Исключая время полета, получим связь высоты полета с длиной и начальной скоростью.

$$H = \frac{g \cdot L^2}{2v_0^2}$$

**Приборы и оборудование:** шарик, линейка, штатив, трубка, кронштейн, лапка, копирка, лист бумаги.

### Экспериментальная часть.

#### Задание 1.

Снимите зависимость  $L(H)$ . Для каждого значения  $H$  проводите не менее 7 запусков. Опишите методику измерений. Проверьте формулу  $H = \frac{g \cdot L^2}{2v_0^2}$ , построив соответствующий график.

#### Задание 2.

Рассчитайте коэффициент наклона графика. Определите начальную скорость шарика  $v_0$ .

#### Задание 3.

Используя закон сохранения энергии, оцените начальную скорость  $v_0^{\text{теор}}$  и сравните со значением, полученным из графика.

## § 23.

### Задание.

Если сферическое тело действует с — скоростью пропорциональной квадрату расстояния, определите...

1. Выведете формулу для стационарного состояния.

2. Придумайте эксперимент для измерения размера и...

3. Определите коэффициент. Какое количество обоснуйте...

4. Оцените...

### Приборы и оборудование:

$\rho = (920 \pm 10)$

$\rho_0 = (1010 \pm 10)$

## § 24.

### Задание.

На рисунке изображены неподвижные линии — нер...

1. Снимите выводы, сделанные на рисунке.

2. Установите соответствие между буквами а) и б) на рисунке.

Приборы и оборудование: линейка.



## § 23. Вязкое трение (9 класс)

### Задание.

Если сферическое тело падает в бесконечной жидкой среде, то на него действует сила вязкого трения, вычисляемая по формуле:  $F = kv$ , где  $v$  — скорость шарика относительно жидкости,  $k$  — коэффициент пропорциональности. Исследовав падение капли воды в масле, определите коэффициент пропорциональности  $k$ . Для этого:

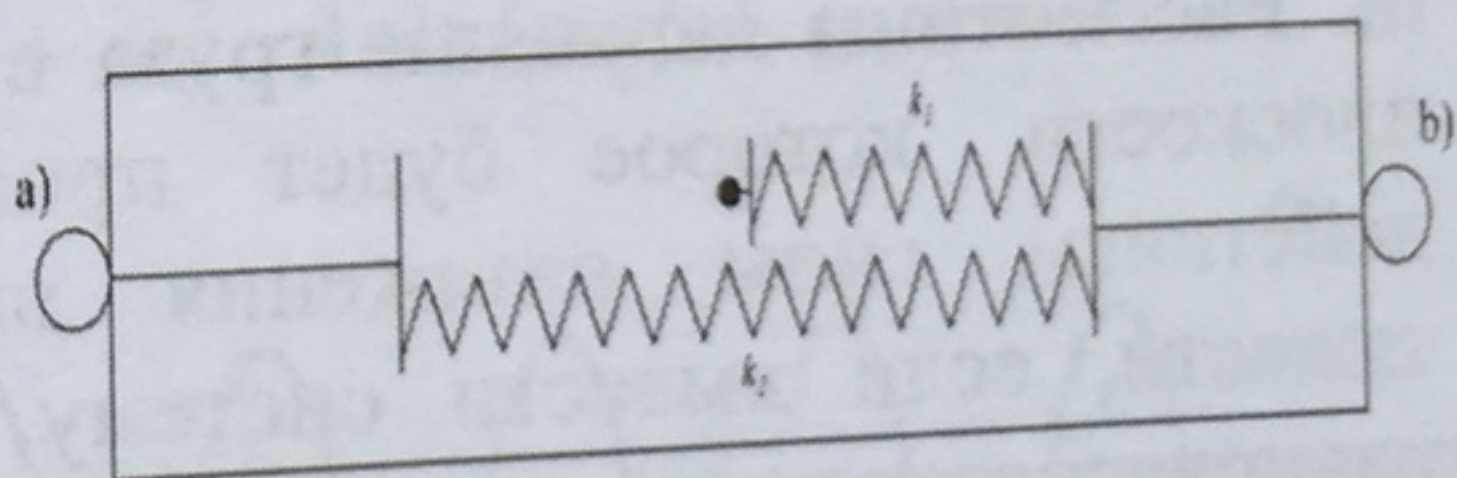
1. Выведите конечную формулу для вычисления  $k$  при движении в стационарном режиме.
2. Придумайте и опишите способ получения капель воды одинакового размера и определите их объем.
3. Определите коэффициент пропорциональности экспериментально. Какое количество экспериментов необходимо провести? Ответ обоснуйте.
4. Оцените погрешности измерений.

**Приборы и оборудование:** пробирка с маслом плотностью  $\rho = (920 \pm 10) \text{ кг/м}^3$ , линейка, стакан с водой плотностью  $\rho_0 = (1010 \pm 10) \text{ кг/м}^3$ , шприц, секундомер.

## § 24. Механический серый ящик (9 класс)

### Задание.

На рисунке изображена схема серого ящика. Чёрная точка в центре — неподвижное крепление; прямые линии — нерастяжимые нити.



1. Снимите зависимости длин нитей, вытягиваемых из первого и второго выводов, от прикладываемой силы.
2. Установите соответствие выводов 1) и 2) серого ящика выводам a) и b) на рисунке. Определите коэффициенты жёсткости  $k_1$  и  $k_2$ .

**Приборы и оборудование:** механический серый ящик, динамометр, линейка.

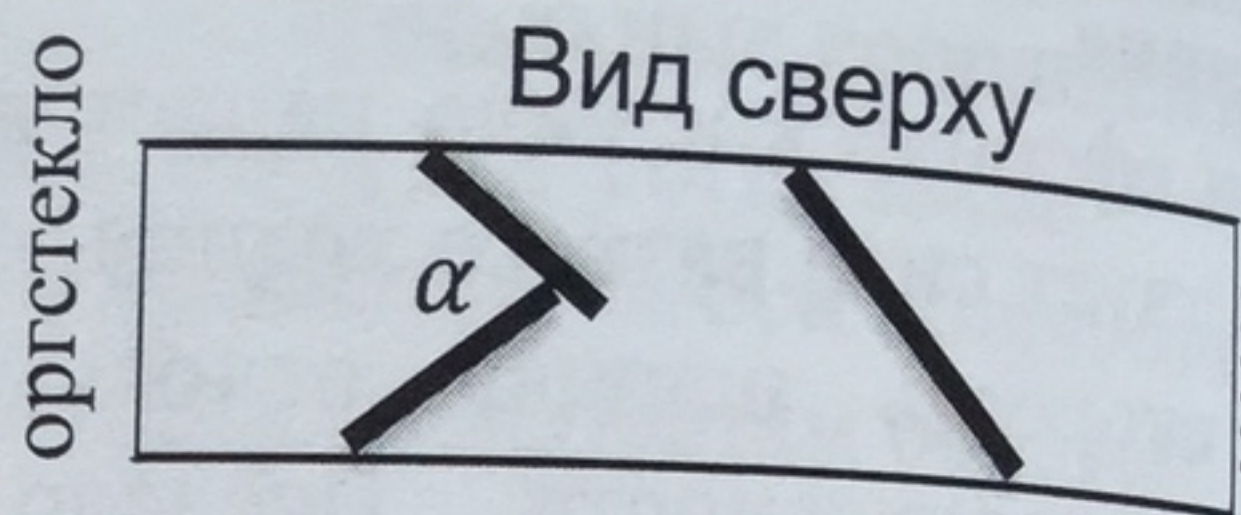


## § 25. Оптический серый ящик (9 класс)

**Задание.**

Определите угол между зеркалами  $\alpha$ .

**Приборы и оборудование:** серый ящик, линейка, миллиметровка



## § 26. Электрический черный ящик (9 класс)

**Задание.**

Определить схему чёрного ящика и параметры её элементов. Все элементы соединяют клеммы черного ящика, узлов цепи внутри нет.

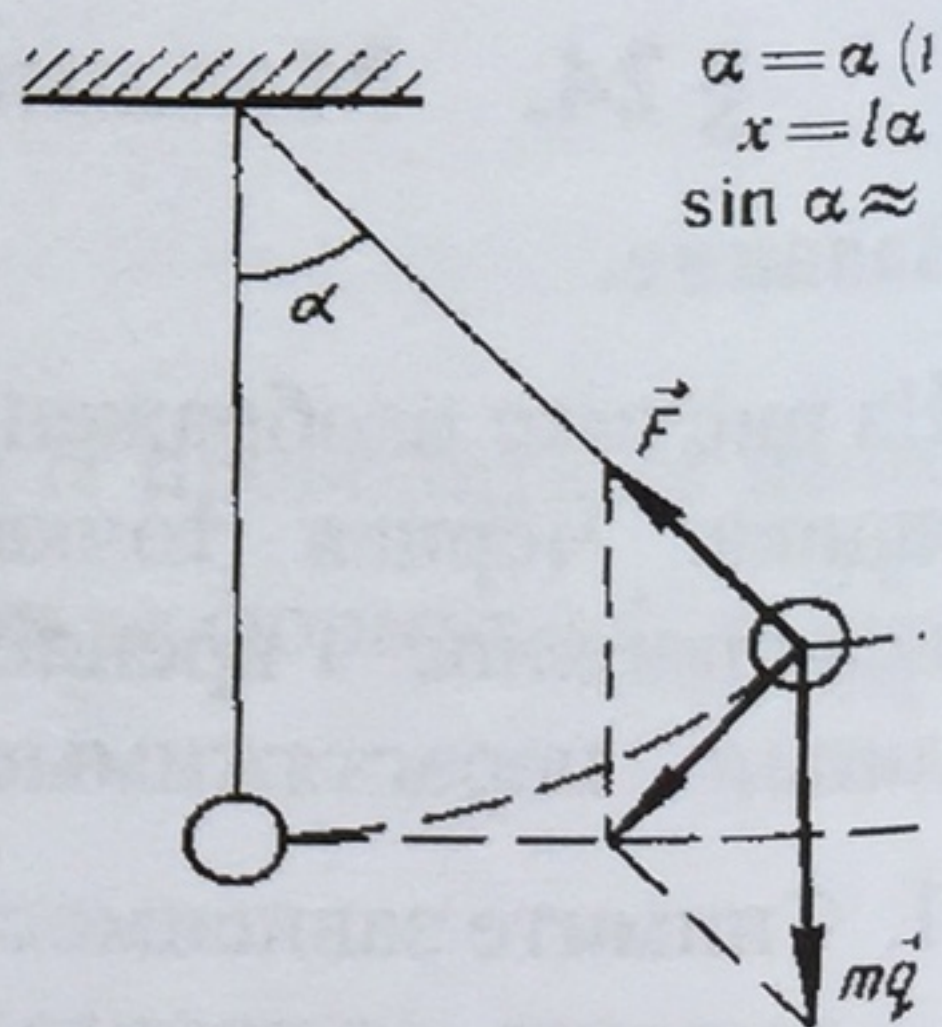
**Приборы и оборудование:** чёрный ящик с 4 выводами, источник постоянного тока 5В, реостат, резистор 30 Ом, два мультиметра, соединительные провода.

## § 27. Математический маятник (9 класс)

**Цель работы:** изучение гармонических колебаний математического маятника.

**Теоретическая часть.**

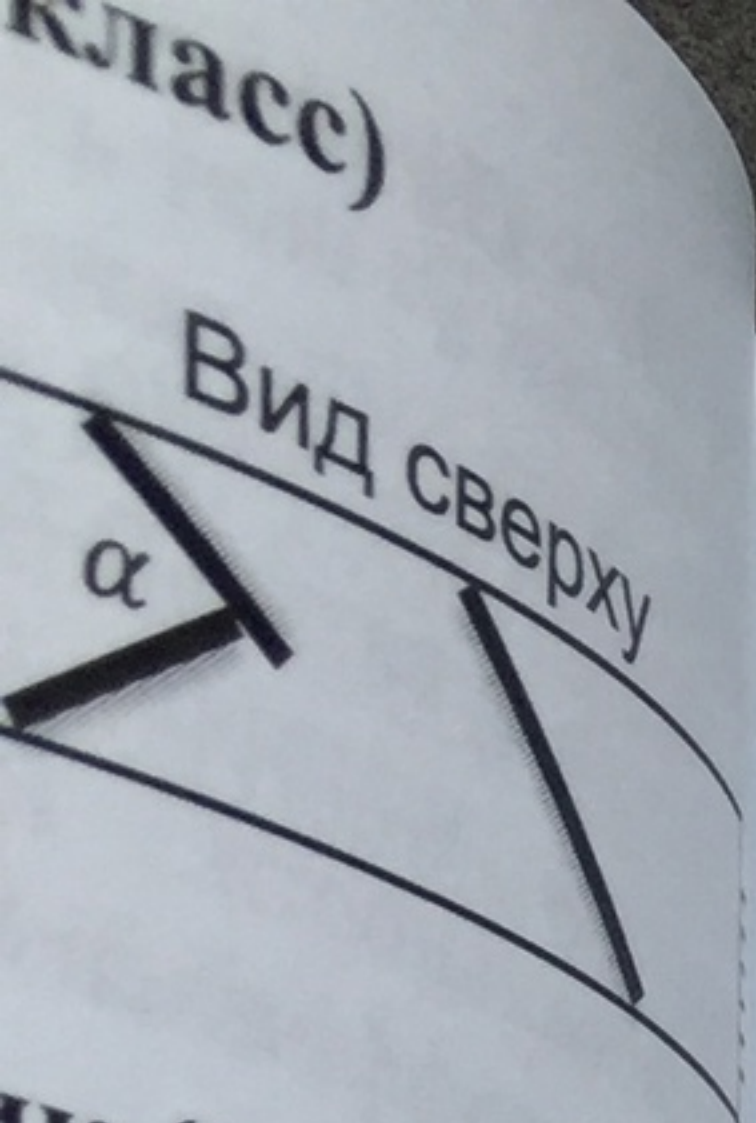
Возьмем простейшую систему, в которой возможны механические колебания. Пусть на невесомой нити длины  $L$  подвешен груз массы  $m$ . Рассмотрим движение груза в вертикальной плоскости, которое будет происходить под действием силы натяжения нити и силы тяжести, если вывести систему из состояния равновесия и предоставить самой себе. Будем считать, что угол отклонения настолько мал, что можно записать  $\sin \alpha \approx \alpha$ .



На тело действуют сила тяжести (вниз) и сила натяжения нити (к точке подвеса). Равнодействующая этих сил имеет две составляющие: тангенциальную, меняющую ускорение по величине, и нормальную, меняющую ускорение по направлению.

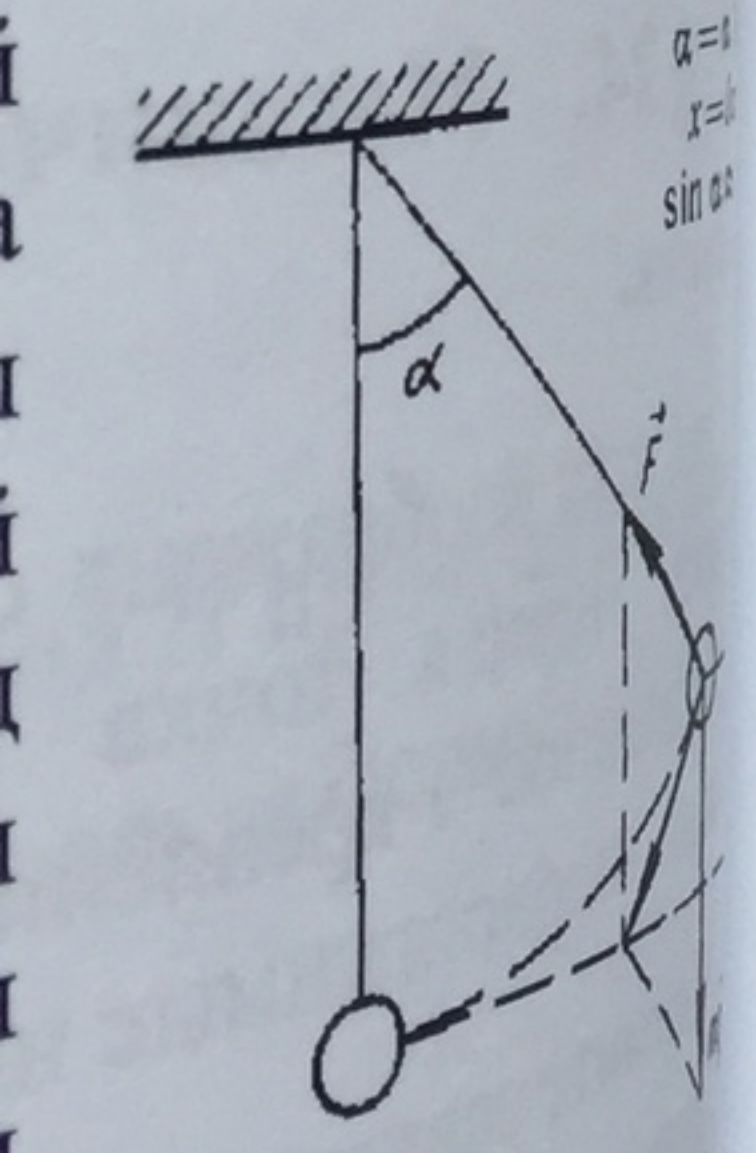
При отклонении груза на угол  $\alpha$  из положения равновесия проекция силы тяжести на ось, перпендикулярную нити, равна





К (9 класс)  
 4 выводами, источ  
 Ом, два мультимет

9 класс)  
 ебаний математическ



сила натяжения нити  
 имеет две составляющие  
 величине, и нормальную  
 положения равновесия  
 нити, равную

$-mgsin\alpha$ , проекция силы натяжения нити равна нулю, проекция ускорения — тангенциальная составляющая  $a_\tau$ . Тогда второй закон Ньютона для груза запишется в виде:

$$ma_\tau = -mgsin\alpha$$

Величина  $a_\tau$  связана с угловым ускорением груза  $\ddot{\alpha}$  соотношением  $a_\tau = L\ddot{\alpha}$  ( $\ddot{\alpha}$  — вторая производная по времени угла отклонения  $\alpha$ ). Преобразуем уравнение, используя приближение для малых углов  $sin\alpha \approx \alpha$ :

$$\ddot{\alpha} + \frac{g}{L}\alpha = 0$$

Введем обозначение  $\sqrt{\frac{g}{L}} = \omega_0$ . Теперь уравнение движения принимает окончательный вид:

$$\ddot{\alpha} + \omega_0^2\alpha = 0$$

Описываемые таким дифференциальным уравнением колебания называются **гармоническими**, а зависимость  $\alpha(t)$  является решением уравнения:

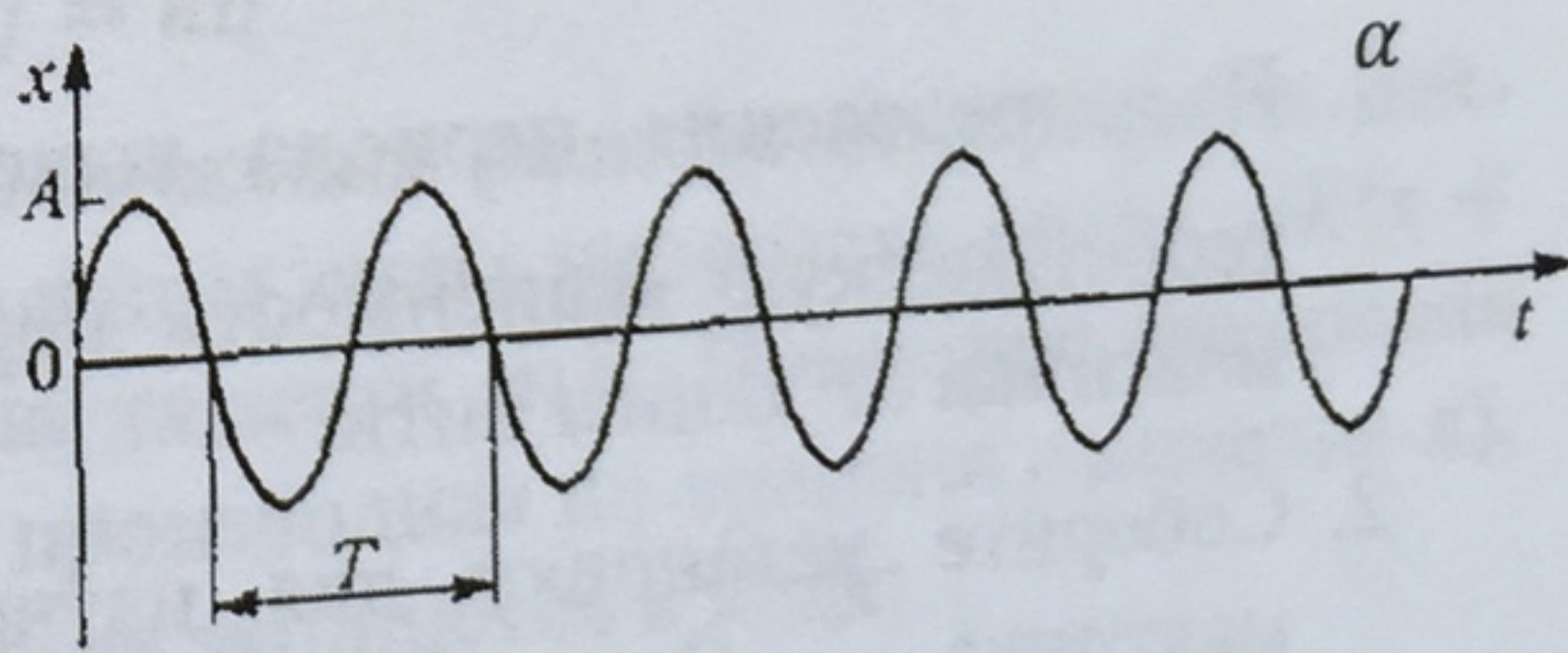
$$\alpha(t) = A\sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

В правильности решения можно убедиться, подставив в уравнение  $\alpha$  и  $\ddot{\alpha}$ :

$$\alpha(t) = A\sin(\omega_0 t + \varphi_0) \Rightarrow \dot{\alpha}(t) = A\omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \Rightarrow \ddot{\alpha}(t) = -A\omega_0^2 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

$$\ddot{\alpha} + \omega_0^2\alpha = -A\omega_0^2 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) + \omega_0^2 \cdot A\sin(\omega_0 t + \varphi_0) = 0$$

График зависимости  $\alpha(t)$  представлен на рисунке.



Величина  $A$  характеризует максимальное отклонение системы от равновесия (если  $\sin(\omega_0 t + \varphi_0) = 1$ , то  $\alpha(t) = A$ ) и называется **амплитудой** колебаний.

Через определенные одинаковые промежутки времени, называемые **периодом** колебаний  $T$ , угол отклонения  $\alpha$  принимает одинаковые значения. Наряду с периодом для характеристики колебаний используют



также обратную величину  $\nu = \frac{1}{T}$  называемую **частотой** (измеряется в герцах – Гц).

Величина  $\omega_0$  называется **циклической частотой** колебаний, измеряется в радианах в секунду ( $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ). Она связана с периодом  $T$  соотношением:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}$$

Весь аргумент синуса называется **фазой** колебаний ( $\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$ ), а значение фазы при  $t = 0$ , то есть постоянная  $\varphi_0$  — **начальной фазой**. Фаза измеряется в радианах (рад).

Значения амплитуды  $A$  и начальной фазы  $\varphi_0$  определяются начальными условиями: углом отклонения  $\alpha_0$  и угловой скоростью  $\dot{\alpha}_0$  в момент времени  $t = 0$ .

$$\begin{cases} \alpha_0(t = 0) = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = A \sin(\varphi_0) \\ \dot{\alpha}_0(t = 0) = A \omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = A \omega_0 \cos(\varphi_0) \end{cases}$$

Считая  $\alpha_0$ ,  $\dot{\alpha}_0$  и  $\omega_0$  известными величинами, из системы уравнений можно определить  $A$  и  $\varphi_0$ .

Фраза **«записать уравнение колебаний системы»** означает, что необходимо найти численные значения величин  $A$ ,  $\omega_0$ ,  $\varphi_0$  и записать  $\alpha(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$  с учетом этих значений.

**Приборы и оборудование:** груз, нить, штатив, муфта, лапка, секундомер.  
**Экспериментальная часть.**

1. Из определения периода выведите формулу  $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$ . Получите теоретическую зависимость периода колебаний математического маятника от длины нити.
2. Соберите установку для изучения колебаний математического маятника. Снимите зависимость периода колебаний математического маятника от длины нити.
3. Проверьте правильность выдвинутой гипотезы. Определите ускорение свободного падения. Равно ли оно теоретическому значению ( $9,815 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ )?



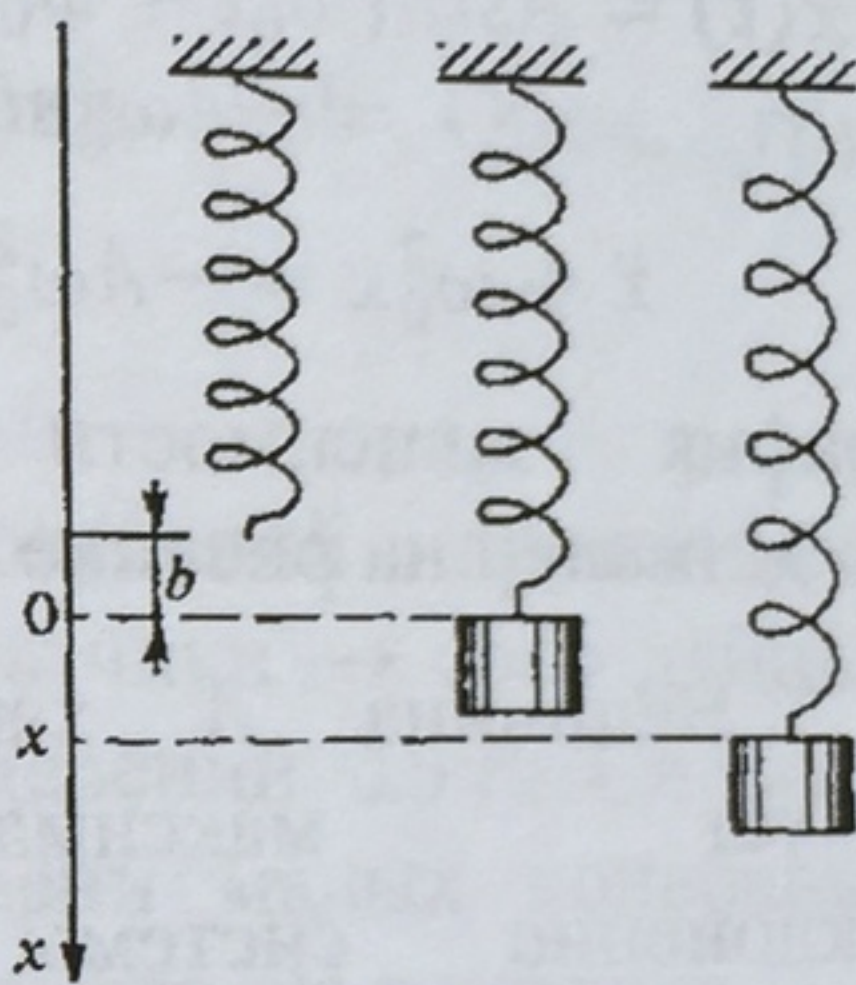
4. Груз, подвешенный на нити длиной  $L = 1$  м, отклонили на угол  $30^\circ$  и отпустили без начальной скорости. Определите циклическую частоту  $\omega_0$ , начальную фазу  $\varphi_0$  и амплитуду колебаний  $A$ . Запишите уравнение колебаний системы с учетом полученных данных.

## § 28. Пружинный маятник (9 класс)

**Цель работы:** изучение гармонических колебаний пружинного маятника.

**Теоретическая часть.**

Возьмем простейшую систему, в которой возможны механические колебания. Пусть на пружине жесткости  $k$  подвешен груз массы  $m$ . Рассмотрим вертикальное движение груза, которое будет происходить под действием силы упругости пружины и силы тяжести, если вывести систему из состояния равновесия и предоставить самой себе. Будем считать, что масса пружины настолько мала, что ею можно пренебречь.



Поместим начало отсчета на направленной вниз оси в точку, соответствующую равновесному положению груза. В этом положении благодаря действию силы тяжести пружина уже растянута на некоторую величину  $b$ , определяемую соотношением:

$$mg = kb$$

При смещении  $x$  груза из положения равновесия проекция действующей на тело со стороны пружины силы упругости равна  $-k(x + b)$ . Так же на груз действует сила тяжести  $mg$ . Проекцию ускорения груза  $a$  обозначим через  $\ddot{x}$  (вторая производная по времени смещения  $x$ ). Тогда второй закон Ньютона для груза запишется в виде:

$$m\ddot{x} = -k(x + b) + mg$$

Учтем начальную деформацию пружины под действием силы тяжести:  $m\ddot{x} = -kx$ . Преобразуем уравнение:

$$\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0$$



Введем обозначение  $\sqrt{\frac{k}{m}} = \omega_0$ . Теперь уравнение движения принимает окончательный вид:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$$

Описываемые таким дифференциальным уравнением колебания называются **гармоническими**, а зависимость  $x(t)$  является решением уравнения:

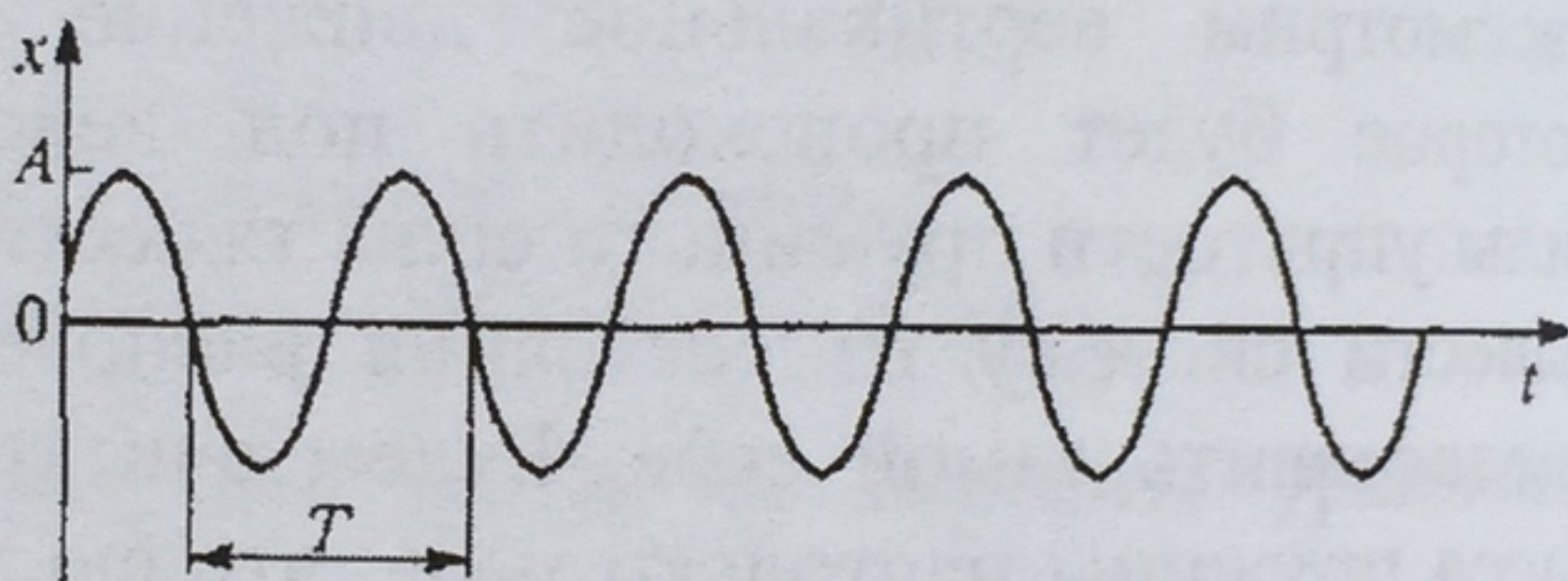
$$x(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

В правильности решения можно убедиться, подставив в уравнение  $x$  и  $\ddot{x}$ :

$$x(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \Rightarrow \dot{x}(t) = A \omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \Rightarrow \ddot{x}(t) = -A \omega_0^2 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = -A \omega_0^2 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) + \omega_0^2 \cdot A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = 0$$

График зависимости  $x(t)$  представлен на рисунке.



Величина  $A$  характеризует максимальное отклонение системы от равновесия (если  $\sin(\omega_0 t + \varphi_0) = 1$ , то  $x(t) = A$ ) и называется **амплитудой** колебаний.

Через определенные одинаковые промежутки времени, называемые **периодом** колебаний  $T$ , смещение  $x$  принимает одинаковые значения. Наряду с периодом для характеристики колебаний используют также обратную величину  $\nu = \frac{1}{T}$  называемую **частотой** (измеряется в герцах – Гц).

Величина  $\omega_0$  называется **циклической частотой** колебаний, измеряется в радианах в секунду ( $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ). Она связана с периодом  $T$  соотношением:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}$$

Весь аргумент синуса называется **фазой** колебаний ( $\varphi = \omega_0 t + \varphi_0$ ), а значение фазы при  $t = 0$ , то есть постоянная  $\varphi_0$  — **начальной фазой**. Фаза измеряется в радианах (рад).



Значения амплитуды  $A$  и начальной фазы  $\varphi_0$  определяются начальными условиями: координатой  $x_0$  и скоростью  $v_0$  в момент времени  $t = 0$ .

$$\begin{cases} x_0(t = 0) = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = A \sin(\varphi_0) \\ v_0(t = 0) = A \omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = A \omega_0 \cos(\varphi_0) \end{cases}$$

Считая  $x_0, v_0$  и  $\omega_0$  известными величинами, из системы уравнений можно определить  $A$  и  $\varphi_0$ .

Фраза «записать уравнение колебаний системы» означает, что необходимо найти численные значения величин  $A, \omega_0, \varphi_0$  и записать  $x(t) = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$  с учетом этих значений.

**Приборы и оборудование:** датчик расстояния, Lab Quest, груз, пружинка, штатив, муфта, лапка.

#### Экспериментальная часть.

1. Соберите установку для изучения колебаний пружинного маятника. Увеличьте частоту измерений (датчики  $\rightarrow$  сбор данных  $\rightarrow$  интервал 0,02). Установите время измерений 15 с. Снимите график зависимости координаты от времени малых колебаний пружинного маятника и схематично перерисуйте его в тетрадь.
2. На графике обозначьте период колебаний и амплитуду колебаний. Укажите численные значения  $T$  и  $A_1$  (амплитуда первого колебания). Определите значение циклической частоты колебаний. Определите коэффициент жесткости пружины  $k$ , считая  $m = (284 \pm 2)$  г. Оцените погрешности.
3. Запишите начальные условия: координату  $x_0$  и скорость  $v_0$  в момент времени  $t = 0$ . Из полученных данных и значения  $\omega_0$  определите начальную фазу  $\varphi_0$  и амплитуду колебаний  $A_2$ . Равна ли она ранее измеренной амплитуде  $A_1$ ? Какой вывод можно сделать?
4. Запишите уравнение колебаний системы с учетом полученных данных.
5. Определите амплитуду последнего колебания  $A_3$ . Равна ли она  $A_1$ ? Какой вывод можно сделать?



## Глава 6. Экспериментальная задача ОГЭ

### § 1. Критерии проверки

Содержание критерия	Баллы
Полностью правильное выполнение задания, включающее в себя: 1) схематичный рисунок экспериментальной установки; 2) формулу для расчёта искомой величины по доступным для измерения величинам; 3) правильно записанные результаты прямых измерений; 4) полученное правильное численное значение искомой величины	4
Приведены все элементы правильного ответа 1–4, но допущена ошибка при вычислении значения искомой величины. ИЛИ Допущена ошибка при обозначении единиц измерения искомой величины. ИЛИ Допущена ошибка в схематичном рисунке экспериментальной установки, или рисунок отсутствует, или отсутствует формула в общем виде для расчёта искомой величины	3
Сделан рисунок экспериментальной установки, правильно приведены значения прямых измерений величин, но не записана формула для расчёта искомой величины, и не получен ответ. ИЛИ Правильно приведены значения прямых измерений величин, записана формула для расчёта искомой величины, но не получен ответ, и не приведён рисунок экспериментальной установки. ИЛИ Правильно приведены значения прямых измерений, приведён правильный ответ, но отсутствуют рисунок экспериментальной установки и формула для расчёта искомой величины	2

Записаны  
измерения  
ИЛИ  
Приведены  
измерения  
формула  
ИЛИ  
Приведены  
измерения  
установка  
Все слу  
вышеуказ  
баллов.  
выполнен

### § 2.

- 1) Рисунок у  
Обозначен
- 2) Теория  
Физически
- 3) Измерения  
Показания
- 4) Расчеты  
Величина=  
Схематичн
- 5) Выводы  
Зависят от
- 6) Расчет по  
Всегда пол

### § 3.

Определен  
Вывод: зн



Записаны только правильные значения прямых измерений.	
ИЛИ Приведено правильное значение только одного из прямых измерений, и представлена правильно записанная формула для расчёта искомой величины.	1
ИЛИ Приведено правильное значение только одного из прямых измерений, и сделан рисунок экспериментальной установки	
Все случаи выполнения, которые не соответствуют вышеуказанным критериям выставления 1, 2, 3 или 4 баллов. Разрозненные записи. Отсутствие попыток выполнения задания	0
Максимальный балл	4

## § 2. План работы

### 1) Рисунок установки

*Обозначения на картинке и словами, измеряемые величины.*

### 2) Теория

*Физические законы и итоговая формула для расчета.*

### 3) Измерения

*Показания приборов. СИ*

### 4) Расчеты

*Величина=формула=подстановка чисел с размерностью=ответ.*

*Схематичные графики.*

### 5) Выводы

*Зависят от формулировки задания.*

### 6) Расчет погрешностей

*Всегда полцены деления и без корней. Если осталось время ☺*

## § 3. Виды заданий

### • Определение физической величины

*Вывод: значение физической величины*



- **Исследование зависимости**

Вывод: *график зависимости, зависимость функции от аргумента – прямая пропорциональность*

- **Опыт, демонстрирующий зависимость**

Вывод: *зависимость (не) существует, при увеличении аргумента функция увеличивается (уменьшается)*

- **Проверка предположения**

Вывод: *в пределах погрешности предположение (не) подтверждено*

## § 4. Пример задания с решением

Используя штатив с муфтой, неподвижный блок, нить, линейку, два груза и динамометр, соберите экспериментальную установку для измерения работы силы упругости при равномерном опускании груза с использованием неподвижного блока. Определите работу, совершаемую при опускании на высоту 20 см.

В бланке ответов:

- 1) сделайте рисунок экспериментальной установки;
- 2) запишите формулу для расчета работы силы упругости;
- 3) укажите результаты измерений силы упругости и пути;
- 4) запишите значение работы силы упругости.

$F_{\text{упр}}$  – сила, показываемая динамометром

$S$  – путь, пройденный динамометром (двумя грузами)

$A$  – работа силы упругости

$$2) \quad A = -F_{\text{упр}} \cdot S$$

$$3) \quad F_{\text{упр}} = 2 \text{ Н}$$

$$S = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}$$

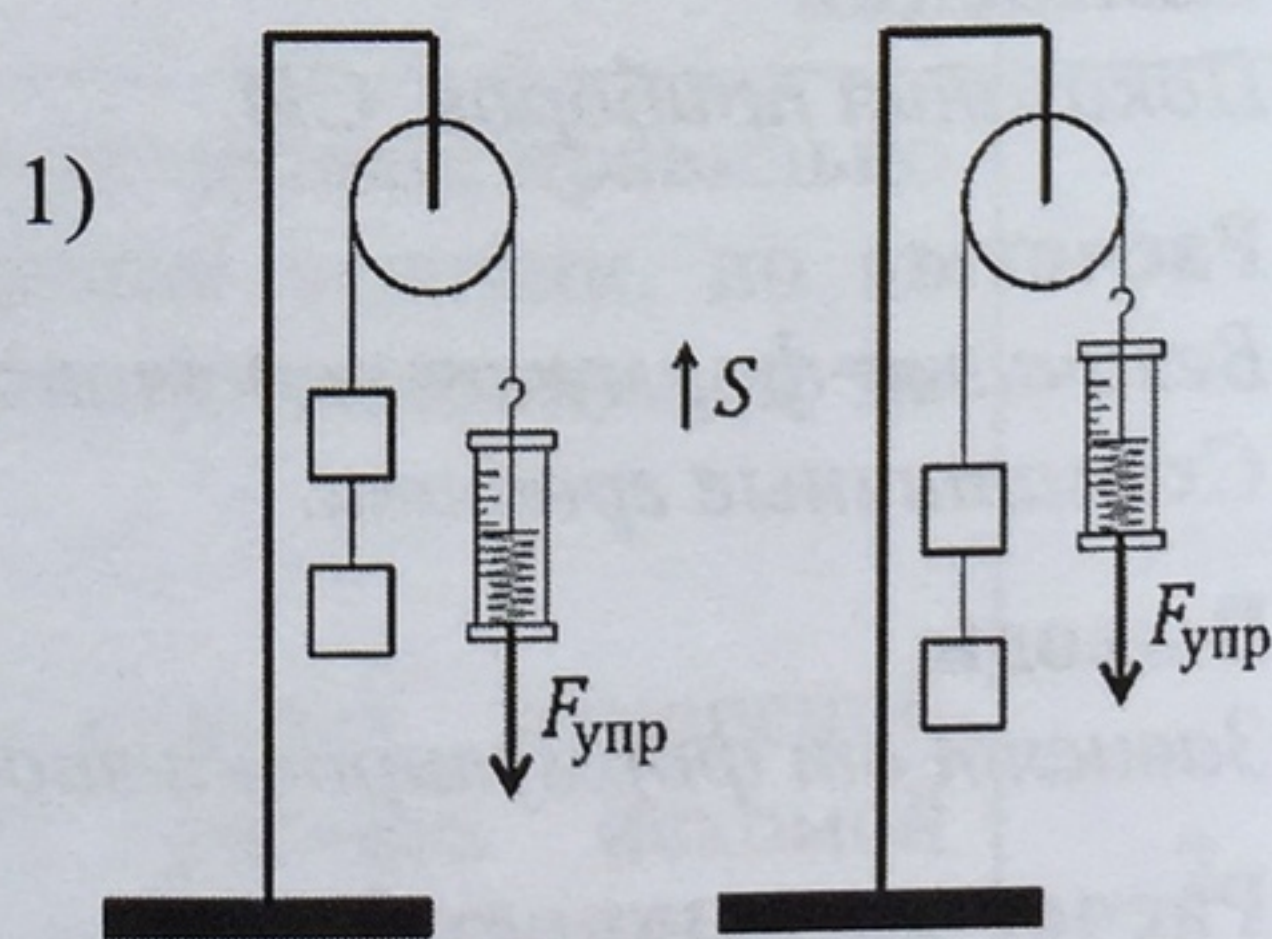
$$4) \quad A = -2 \text{ Н} \cdot 0,2 \text{ м} = -0,4 \text{ Дж}$$

$$A = -0,4 \text{ Дж}$$

$$\varepsilon_A = \varepsilon_S + \varepsilon_{F_{\text{упр}}} = \frac{0,5 \text{ мм}}{200 \text{ мм}} + \frac{0,1 \text{ Н}}{2 \text{ Н}} = 0,05125 = 5,125\%$$

$$\Delta A = |A| \cdot \varepsilon_A = 0,4 \text{ Дж} \cdot 0,05125 = 0,0205 \text{ Дж}$$

$$A = (-0,400 \pm 0,021) \text{ Дж}, \quad \varepsilon_A = 5\%$$





### §5. Пример задания с комплектом оборудования 1 (плотность)

Используя рычажные весы с разновесами, мензурку, стакан с водой, цилиндр №1, соберите экспериментальную установку для определения плотности материала, из которого изготовлен цилиндр №1.

В бланке ответов:

- 1) сделайте рисунок экспериментальной установки для определения объёма тела;
- 2) запишите формулу для расчёта плотности;
- 3) укажите результаты измерения массы цилиндра и его объёма;
- 4) запишите численное значение плотности материала цилиндра.

### §6. Пример задания с комплектом оборудования 2 (сила Архимеда)

Используя динамометр, стакан с водой, цилиндр №2, соберите экспериментальную установку для определения выталкивающей силы, действующей на цилиндр.

В бланке ответов:

- 1) сделайте рисунок экспериментальной установки;
- 2) запишите формулу для расчёта выталкивающей силы;
- 3) укажите результаты измерений веса цилиндра в воздухе и веса цилиндра в воде;
- 4) запишите численное значение выталкивающей силы.

### §7. Пример задания с комплектом оборудования 3 (закон Гука)

Используя штатив с муфтой и лапкой, пружину, динамометр, линейку и набор из трёх грузов, соберите экспериментальную установку для исследования зависимости силы упругости, возникающей в пружине, от степени растяжения пружины.

В бланке ответов:

- 1) определите растяжение пружины, подвешивая к ней поочередно один, два и три груза. Для определения веса грузов воспользуйтесь динамометром;



- 2) сделайте рисунок экспериментальной установки. Укажите результаты измерения веса грузов и удлинения пружины для трех случаев в виде таблицы;
- 3) постройте график зависимости силы упругости, возникающей в пружине, от степени растяжения пружины
- 4) сформулируйте вывод о зависимости силы упругости, возникающей в пружине, от степени растяжения пружины.

### §8. Пример задания с комплектом оборудования 4 (сила трения)

Используя каретку (брусок) с крючком, динамометр, набор из трёх грузов, направляющую рейку, соберите экспериментальную установку для исследования зависимости силы трения скольжения между кареткой и поверхностью горизонтальной рейки от силы нормального давления. Определите силу трения скольжения, помещая на каретку поочерёдно один, два и три груза. Для определения веса каретки с грузами воспользуйтесь динамометром.

В бланке ответов:

- 1) сделайте рисунок экспериментальной установки;
- 2) укажите результаты измерений веса каретки с грузами и силы трения скольжения для трёх случаев в виде таблицы;
- 3) постройте график зависимости силы трения скольжения между кареткой и поверхностью рейки от силы нормального давления.
- 4) сформулируйте вывод о зависимости силы трения скольжения между кареткой и поверхностью рейки от силы нормального давления.

### §9. Пример задания с комплектом оборудования 5 (электричество)

Используя источник тока, амперметр, реостат, ключ, соединительные провода, резисторы, обозначенные  $R_1$  и  $R_2$ , проверьте экспериментально правило сложения силы электрического тока при параллельном соединении двух проводников.

В бланке ответов:

- 1) нарисуйте электрическую схему экспериментальной установки;



- 2) с помощью реостата установите силу тока в неразветвленной части цепи 0,56 А и измерьте силу электрического тока в каждом из резисторов при их параллельном соединении;
- 3) сравните общую силу тока (до разветвления) с суммой сил тока в каждом из резисторов (в каждом из ответвлений), учитывая, что погрешность прямых измерений с помощью амперметра составляет 0,015 А;
- 4) сделайте вывод о справедливости или ошибочности проверяемого правила.

### §10. Пример задания с комплектом оборудования 6 (оптика)

Используя собирающую линзу, экран, лампу на подставке, источник тока, соединительные провода, ключ, линейку, проверьте предположение:  $f + d = \text{const}$ . Здесь  $f$  – расстояние от линзы до изображения, а  $d$  – расстояние от линзы до предмета.

В бланке ответов:

- 1) сделайте рисунок экспериментальной установки;
- 2) проведите серию измерений, каждый раз определяя  $f$  и  $d$ ;
- 3) определите допустимый интервал значений для  $f + d$  (погрешность прямых измерений не менее 0,5 см);
- 4) сделайте вывод о справедливости или ошибочности проверяемого предположения.

### §11. Пример задания с комплектом оборудования 7 (математический маятник)

Используя штатив с муфтой и лапкой, груз с прикрепленной к нему нитью, линейку и секундомер, соберите установку для проведения опыта, демонстрирующего зависимость частоты колебаний математического маятника от длины нити.

В бланке ответов:

- 1) сделайте рисунок экспериментальной установки;
- 2) запишите формулу для расчёта частоты колебаний;
- 3) рассчитайте значение частоты колебаний для различных длин нити, измерив период колебаний;
- 4) сделайте вывод о наличии или отсутствии зависимости.



## §12. Пример задания с комплектом оборудования 8 (рычаги и блоки)

Используя штатив с муфтой и лапкой, рычаг, набор из трех грузов и динамометр, соберите установку для проведения опыта, демонстрирующего зависимость силы упругости, возникающей в пружине, от ее плеча.

В бланке ответов:

- 1) сделайте рисунок экспериментальной установки;
- 2) подвесьте два груза на расстоянии 10 см от оси вращения справа.
- 3) измерьте силу упругости пружины динамометра, которая удерживает рычаг в равновесии, если она приложена слева на расстояниях 5 см, 10 см и 15 см от оси вращения рычага.
- 4) сделайте вывод о наличии или отсутствии зависимости.

## Глава 7.

### §1.

Электрические цепи в непрозрачном корпусе. Из корпуса выведены различные элементы, можно определить элементы, входящие в состав.

Задачи с черным ящиком. Экспериментальные решения. Очень интересны для школьников. Простая задача – в этом ящике – в этом внутреннем содержании элементов, и определить их.

Рассмотрим

1. В черном ящике выведены четыре одинаковых электрических элемента.
2. В «черном ящике» выведена цепь, состоящая из сопротивлений переменного тока, максимальная мощность выведена.

В первой задаче выведено ровно четыре элемента. Они могут быть соединены по-разному, обязательно при этом.

Наконец, если известна мощность, это ящик будет работать с определенными результатами.



## Глава 7. Электрический черный ящик

### §1. Классификация

Электрический черный ящик – электрическая цепь, спрятанная в непрозрачном корпусе, внутрь которого нет непосредственного доступа. Из корпуса выходят несколько выводов, подключая к которым различные электроизмерительные приборы и снимая их показания, можно определить схему цепи черного ящика и найти параметры элементов, входящих в цепь.

Задачи с черными ящиками считаются одними из самых сложных экспериментальных заданий из-за многообразия возможных вариантов решений. Очень часто на экспериментальных турах олимпиад по физике школьникам предлагается исследовать строение так называемого серого ящика – в этом случае ученик обладает дополнительной информацией о внутреннем содержимом ящика. Это может быть и знание о количестве элементов, и ограничения на соединения элементов, и наличие только определенного видов элементов.

Рассмотрим пример таких заданий:

1. В черном ящике собрана электрическая цепь, состоящая из четырех одинаковых сопротивлений. Определить схему собранной электрической цепи и величину сопротивления.
2. В «черном ящике», имеющем 3 вывода, собрана электрическая цепь, состоящая из нескольких резисторов с постоянным сопротивлением и одного переменного резистора. Сопротивление переменного резистора можно изменять от нуля до некоторого максимального значения  $R_0$  с помощью регулировочной ручки, выведенной наружу. Определите схему собранной цепи.

В первой задаче в цепи присутствуют только одинаковые резисторы, их ровно четыре. Во второй задаче количество резисторов не ограничено, они могут быть как разными, так и одинаковыми. Однако, в цепи обязательно присутствует один реостат.

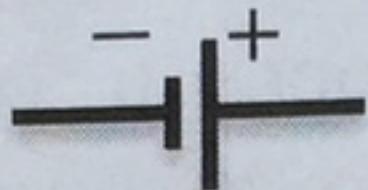
Наконец, бывают задачи, где схема электрической цепи заранее известна – это белый ящик. Далее, на примере простейшего белого ящика будут рассмотрены методы выявления элементов цепи и анализа результатов.



## §2. Основные элементы электрической цепи

Рассмотрим пять основных элементов электрической цепи. В программу 8 класса школьной физики входят три элемента: батарейка, резистор и лампочка. В дальнейшем рассматриваются еще диоды и конденсаторы. Все эти элементы имеют свои особенности и методы обнаружения.

Батарейка.

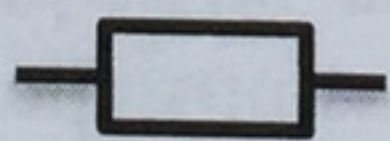


До конца 18-го века учёные «получали электричество», то есть сообщали телам электрические заряды, в основном посредством трения. В конце 18-го века произошёл решительный и счастливый поворот в изучении электрических явлений.

Итальянский учёный А. Вольта обнаружил, что если между медной и цинковой пластинками проложить кусок пропитанной кислотой ткани, то медная пластинка приобретает положительный заряд, а цинковая — отрицательный. Это значит, что происходит разделение зарядов: положительные заряды накапливаются на одном полюсе источника, а отрицательные — на другом. Если соединить проводником медную и цинковую пластинки, то в нём возникает электрический ток. Так был изобретён первый источник тока.

Источники тока, действие которых обусловлено химическими реакциями, называют гальваническими элементами. Назван в честь Луиджи Гальвани, итальянского профессора медицины, исследовавшего электрические явления при мышечном сокращении. При разделении зарядов необходимо преодолевать притяжение между разноимёнными зарядами, то есть совершать работу. В гальваническом источнике тока эта работа совершается за счёт уменьшения внутренней энергии: вследствие химических реакций уменьшается потенциальная энергия взаимодействия атомов. Гальванические элементы широко используют и сегодня — это хорошо знакомые вам батарейки и аккумуляторы. Аккумулятор отличается от батарейки тем, что батарейку можно использовать только один раз, а аккумулятор можно заряжать многократно.

Резистор.



Исследуя электрические цепи, ученые обнаружили, что сила тока в проводнике зависит от напряжения на этом проводнике. Зависимость силы тока  $I$  в проводнике от напряжения  $U$  записывают в виде  $I = \frac{U}{R}$ .

Входящую в эту  
сопротивлением  
выбрали сопротивл  
А при напряжении

Резистор —  
постоянным сопро  
Является одним  
электронике. Е  
преобразовывая  
большая часть то

Так как рез  
написанный на  
маркировки рези

Буквенно-ци  
содержит инфор  
клонения от ука  
резисторов обо  
Принято обозна

Если знач

обозначение  
сопротивление  
вместо нуля це  
единицы измер  
десятичной др  
обозначение ед  
 $1\text{M}5 = 1,5\text{МОм}$

Допустим  
таблице:

Буквы	Допуск в %
-------	------------

Цветовая  
разноцветных  
Маркировочны  
резистора. Пе  
длина резисто  
последний зна



Входящую в эту формулу величину  $R$  называют электрическим сопротивлением проводника. В качестве единицы сопротивления выбрали сопротивление такого проводника, в котором сила тока равна 1 А при напряжении 1 В. Эту единицу сопротивления обозначают «Ом».

Резистор - пассивный элемент электрических цепей, обладающий постоянным сопротивлением (сила тока пропорциональна напряжению). Является одним из наиболее распространённых компонентов в электронике. Его назначение - сопротивляться течению тока, преобразовывая часть его в тепло. Чем больше сопротивление, тем большая часть тока рассеивается в тепло.

Так как резисторы представляют собой мелкие детали, прочесть написанный на них номинал сложная задача. Существуют два способа маркировки резисторов: буквенно-цифровая и цветовая.

Буквенно-цифровую маркировку наносят на корпус резистора. Она содержит информацию о сопротивлении резистора и о возможном отклонении от указанного значения в процентах - допуск. Сопротивления резисторов обозначают цифрами с указанием единицы измерения. Принято обозначать буквами:  $R$  - Ом,  $K$  - кОм,  $M$  - МОм.

Если значение сопротивления выражается целым числом, то обозначение единицы измерения ставят после числа. Если сопротивление выражается десятичной дробью, меньшей единицы, то вместо нуля целых и запятой впереди цифры располагают обозначение единицы измерения. Если сопротивление выражается целым числом с десятичной дробью, то после целого числа вместо запятой ставят обозначение единицы измерения. Пример:  $15R = 15 \text{ Ом}$ ;  $K27 = 0,27 \text{ кОм}$ ;  $1M5 = 1,5 \text{ МОм}$ .

Допустимые отклонения сопротивления (допуск) указаны в таблице:

Буквы	B	C	D	F	G	J	K	M	N
Допуск в %	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	30

Цветовая маркировка резисторов представляет собой набор разноцветных круговых полос, нанесенных на поверхность резистора. Маркировочные знаки, как правило, сдвинуты к одному из торцов резистора. Первым считают знак, нанесенный рядом с торцом. Если длина резистора не позволяет сдвинуть маркировку к одному из торцов, последний знак рисуют крупнее остальных.



Для расшифровки маркировки служит таблица, в которой указано, каким именно цифрам соответствует каждый цветовой знак. Число знаков может быть 5, 4 или 3.

Если знаков 5, то они читаются так:

первый знак -	первая цифра значения сопротивления,	
второй знак -	вторая цифра значения сопротивления,	
третий знак -	третья цифра значения сопротивления,	
четвертый знак -	множитель, на который нужно умножить полученное трехзначное число,	умножить
пятый знак -	допустимое отклонение.	

Если знаков 4, то они читаются так:

первый знак -	первая цифра значения сопротивления,	
второй знак -	вторая цифра значения сопротивления,	
третий знак -	множитель, на который нужно умножить полученное двузначное число,	умножить
четвертый знак -	допустимое отклонение.	

Три знака наносят на резисторы с допусками 20% и более, погрешности не маркируются.

первый знак -	первую цифру значения сопротивления,
второй знак -	вторую цифру значения сопротивления,
третий знак -	множитель.

Цвет знака	Значение цвета				
	Номинальное сопротивление, Ом				Допуск, %
	Первая цифра	Вторая цифра	Третья цифра	Множитель	
Серебристый	-	-	-	$10^{-2}$	10
Золотистый	-	-	-	$10^{-1}$	5
Черный	-	0	-	1	-
Коричневый	1	1	1	10	1
Красный	2	2	2	$10^2$	2
Оранжевый	3	3	3	$10^3$	-
Желтый	4	4	4	$10^4$	-
Зеленый	5	5	5	$10^5$	0,5
Голубой	6	6	6	$10^6$	0,25
Фиолетовый	7	7	7	$10^7$	0,1
Серый	8	8	8	$10^8$	0,05
Белый	9	9	9	$10^9$	-

Лампочка.  
Лампа нака  
испускает  
свет электрическим то  
спираль из во  
вольфрамовых н  
Часть потребл  
преобразует в в  
атмосферном в  
окисляется. По  
заполненную ин

Опыты по  
нагреванию уве  
усиливаются те  
решётку. Это  
приводит к уве  
проводника. У  
увеличиться в  
нити лампы на  
комнатной те  
полупроводник

В лам  
должно наблю  
от закона  
сопротивление  
изменяться  
нагревании. Т  
не будет прям  
напряжению.  
сложное соот  
сопротивлени  
будет возраст  
нагревания п  
I будет нару  
характеристи  
функцию.



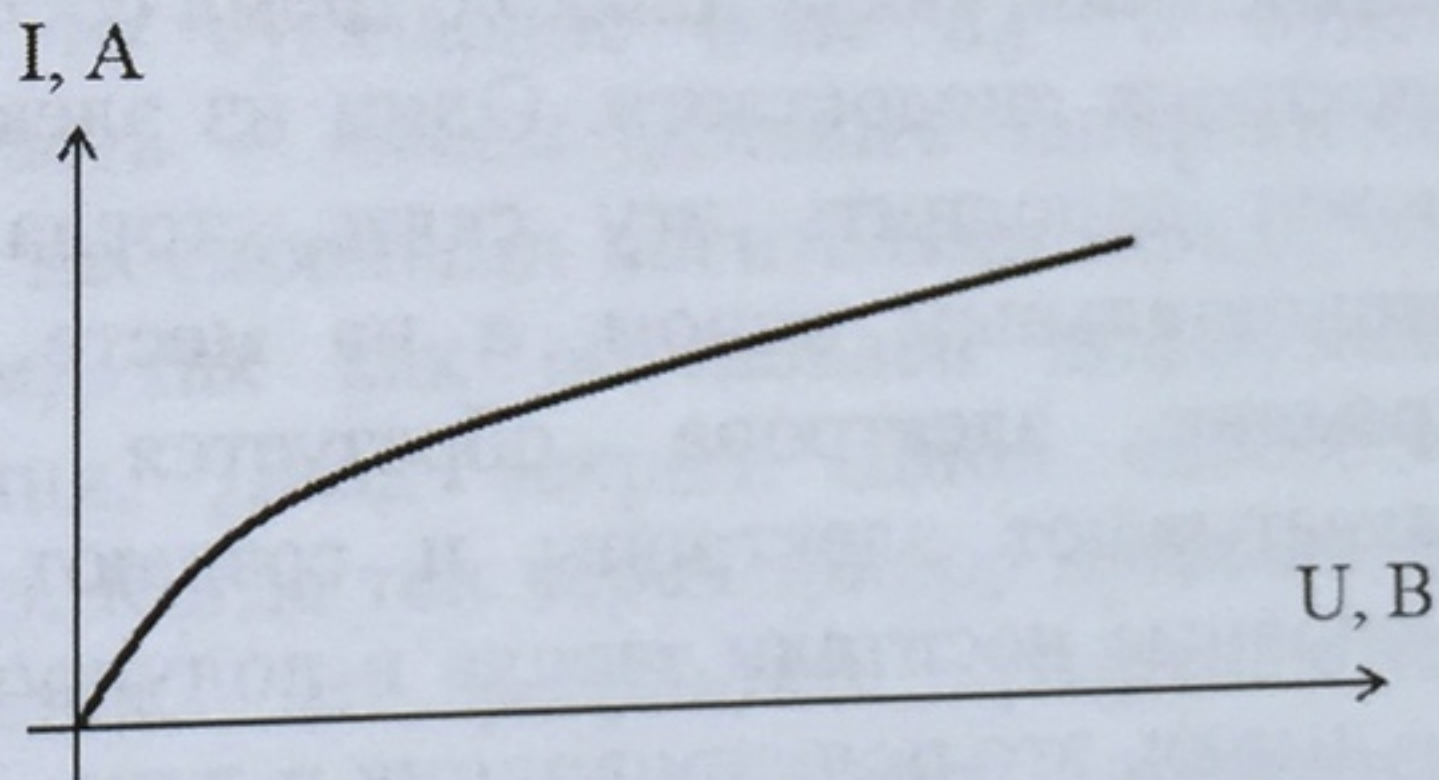
## Лампочка.



Лампа накаливания — искусственный источник света, в котором свет испускает спираль из тугоплавкого металла, нагреваемая электрическим током до высокой температуры. Чаще всего используется спираль из вольфрама или угольная нить. Рабочие температуры вольфрамовых нитей ламп накаливания лежат в пределах 2000—2800 °С. Часть потребляемой электрической энергии лампа накаливания преобразует в видимое излучение, часть рассеивается в виде тепла. В атмосферном воздухе при высоких температурах вольфрам быстро окисляется. По этой причине тела накала помещают в колбу, заполненную инертными газами.

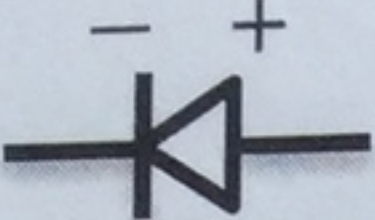
Опыты показывают, что удельное сопротивление металлов при нагревании увеличивается. Объясняется это тем, что при нагревании усиливаются тепловые колебания ионов, образующих кристаллическую решётку. Это затрудняет движение свободных электронов, что и приводит к увеличению сопротивления при нагревании металлического проводника. Удельное сопротивление металла может при нагревании увеличиться в несколько раз. Например, сопротивление раскалённой нити лампы накаливания в 10—12 раз больше, чем её сопротивление при комнатной температуре! А вот сопротивление электролитов и полупроводников при нагревании уменьшается.

В лампе накаливания должно наблюдаться отклонение от закона Ома, поскольку сопротивление спирали будет изменяться при ее нагревании. Тогда сила тока уже не будет прямо пропорциональна напряжению. Получится более сложное соотношение  $I(U) = \frac{U}{R(U)}$ .



В этой формуле подчеркнуто, что сопротивление не постоянно. С увеличением напряжения сила тока будет возрастать, а следовательно будет расти и сопротивление за счет нагревания проводника. Поэтому прямая пропорциональность между  $U$  и  $I$  будет нарушаться, и ток будет возрастать медленнее. Вольт-амперная характеристика представляет собой нелинейную возрастающую функцию.



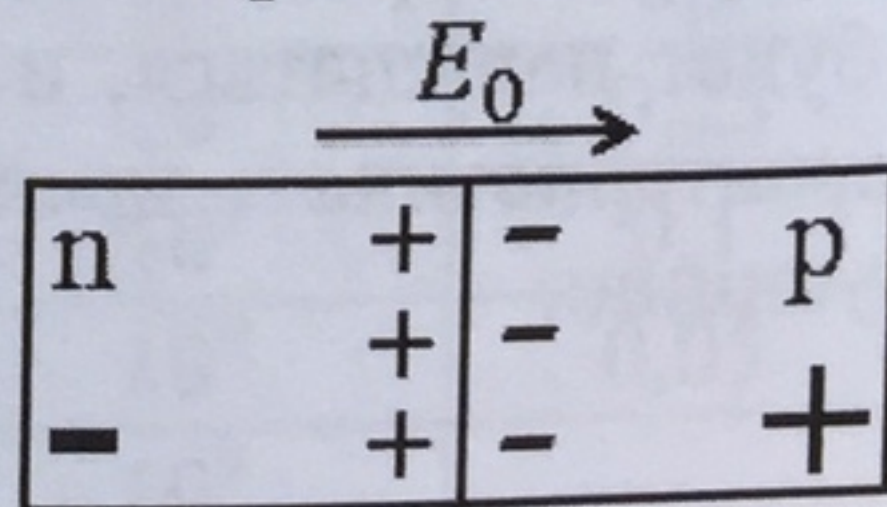
Диод. 

Примесная проводимость полупроводников — электрическая проводимость, обусловленная наличием в полупроводнике донорных или акцепторных примесей. Изменяя концентрацию примесей, можно значительно увеличивать число носителей зарядов того или иного знака и создавать полупроводники с преимущественной концентрацией либо отрицательно, либо положительно заряженных носителей.

Примеси можно разделить на донорные (отдающие) и акцепторные (принимающие). Рассмотрим механизм электропроводности полупроводника с донорной пентавалентной примесью мышьяка  $As^{5+}$ , которую вводят в кристалл, например, кремния  $Si^{4-}$ . Пентавалентный атом мышьяка отдает четыре валентных электрона на образование ковалентных связей, а пятый электрон оказывается незанятым в этих связях. Положительные ионы мышьяка не могут захватить электроны соседних атомов, так как все четыре связи у них уже укомплектованы электронами. Донорные примеси — это примеси, поставляющие электроны проводимости, мы получаем полупроводник с преимущественно электронной проводимостью, называемый полупроводником n-типа.

В случае акцепторной примеси, например, трехвалентного индия  $In^{3+}$  атом примеси может дать свои три электрона для осуществления ковалентной связи только с тремя соседними атомами кремния, а одного электрона «недостает». Один из электронов соседних атомов кремния может заполнить эту связь, тогда атом  $In$  станет неподвижным отрицательным ионом, а на месте ушедшего от одного из атомов кремния электрона образуется дырка. Акцепторные примеси захватывают электроны и создают тем самым подвижные дырки. Основные носители заряда в полупроводнике с акцепторной примесью — дырки, это полупроводник p-типа.

Контакт p- и n-полупроводников, названный p-n переходом, играет главную роль в работе диода. Рассмотрим явления на границе раздела полупроводников **в отсутствие электрического тока**. Из-за теплового движения происходит взаимная диффузия носителей заряда, электроны переходят в p-область, дырки переходят в n-область. Таким образом, вблизи границы p-область заряжена отрицательно, а n-область положительно. Возникает электрическое поле  $E_0$ , направленное от положительного заряда к



отрицательно  
электрический  
запирающим  
препятствует  
как под его д  
Неосновные  
устанавливает  
во внешнюю э

Существо  
Прямое вкл  
батарейки, а  
плюсу. В это  
электрическое  
навстречу за  
Значит, движе  
зависеть от с  
зарядов в пол  
к границе ра  
носители так  
основными  
включения. Е  
напряжения, н  
проводимости  
направлено и  
напряжение  $E$   
называется д  
зарядов из-за  
выдержать огр  
этот предел  
кристаллическ  
непригодным.

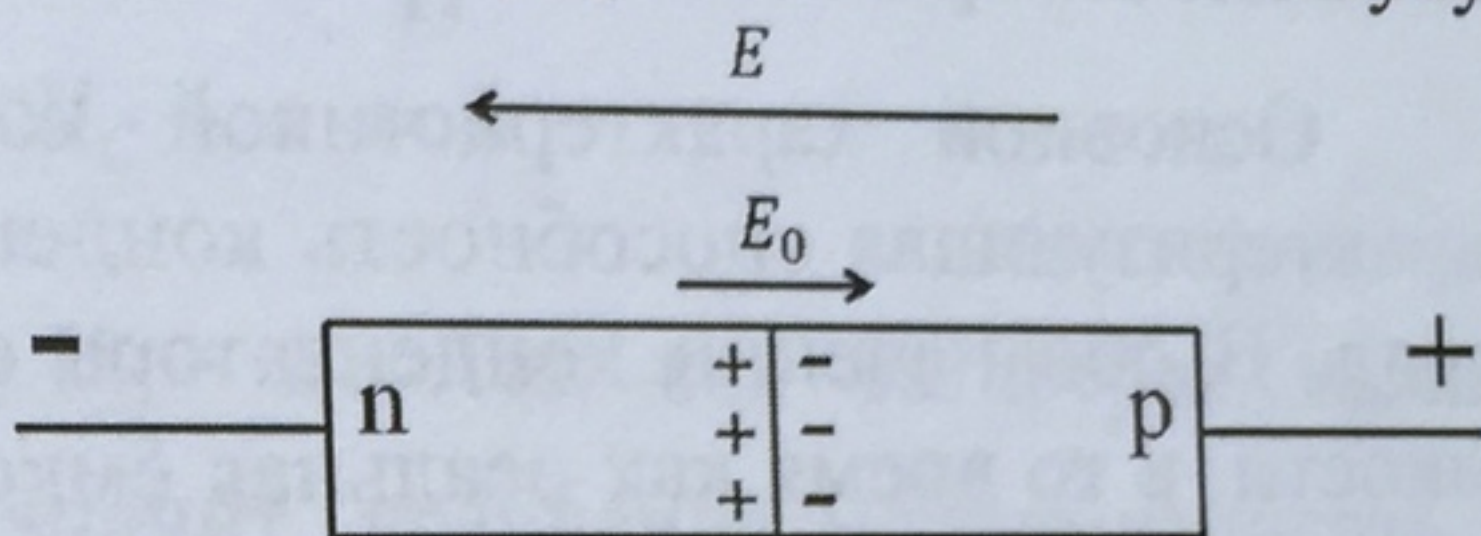
Обратное вк  
батарейки, а  
электрическое  
зарядов снова  
зарядов в пол  
от границы ра  
заряда будут  
утечки. Он оч



отрицательному — то есть, из n-области в p-область. Двойной электрический слой, возникающий на границе раздела, называют запирающим слоем. А поле  $E_0$  — запирающим полем. Это поле препятствует дальнейшей взаимной диффузии электронов и дырок, так как под его действием основные заряды двигаются от границы раздела. Неосновные заряды, двигаясь к границе раздела, рекомбинируют — устанавливается динамическое равновесие. При включении p-n перехода во внешнюю электрическую цепь равновесие нарушается.

Существует два типа включения диода: прямое и обратное. **Прямое включение** — подключение n-полупроводника к минусу

батарейки, а p-полупроводника к плюсу. В этом случае внешнее электрическое поле  $E$  направлено навстречу запирающему полю.

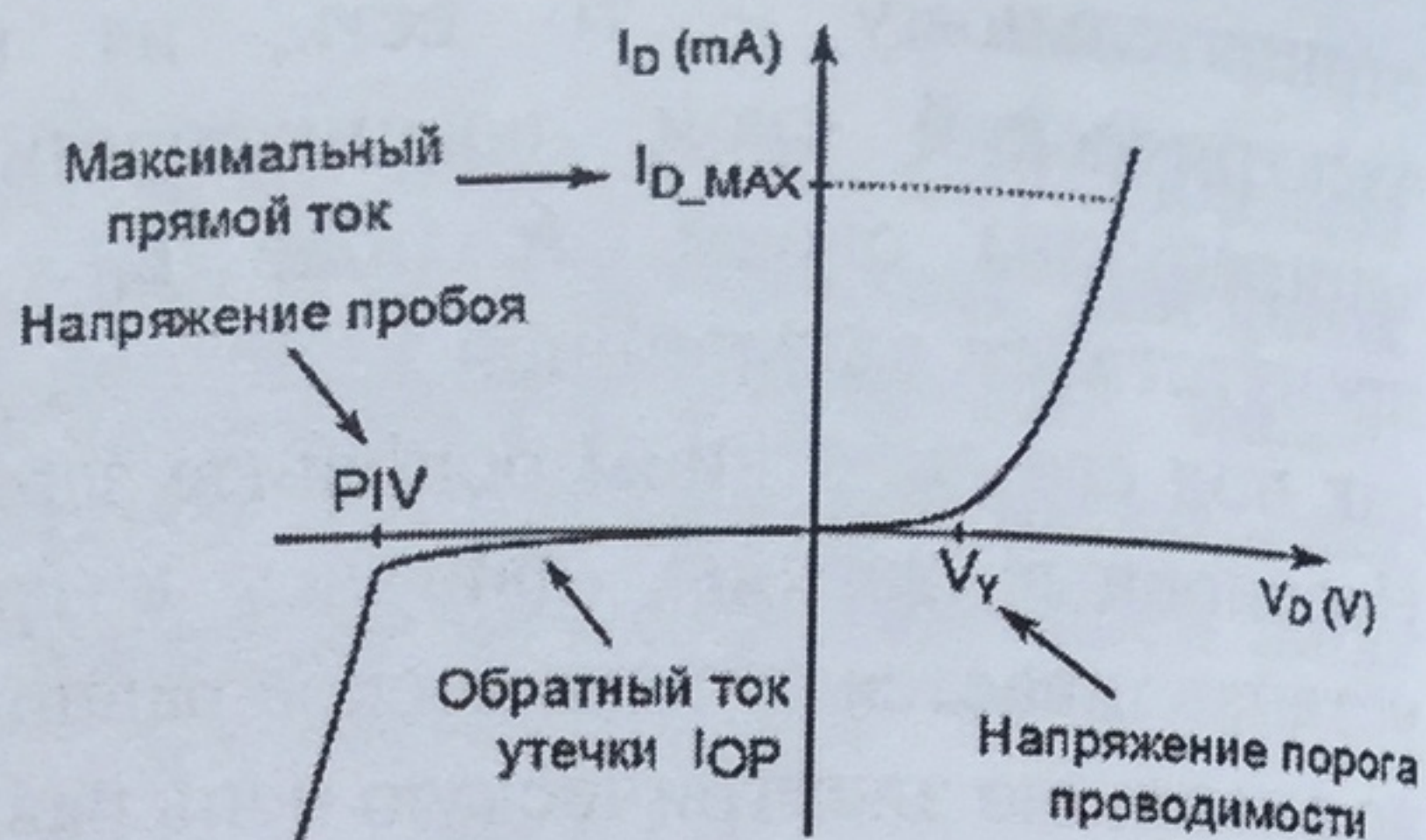


Значит, движение зарядов будет зависеть от суммы полей  $E_0$  и  $E$ . Если  $E_0 < E$ , основные носители зарядов в полупроводниках под действием поля  $E - E_0$  будут двигаться к границе раздела и рекомбинировать друг с другом. Неосновные носители так же рекомбинируют. Таким образом, ток создается основными носителями заряда, он называется током прямого включения. Величина тока начинает резко расти при достижении напряжения, необходимого для «открытия» диода — напряжения порога проводимости. Если же  $E < E_0$ , то суммарное поле  $E_0 - E$  будет направлено из n-области в p-область — имеем меньшее запирающее напряжение  $E_0 - E$ . Ток создается неосновными носителями заряда, он называется диффузионным током, так как обусловлен диффузией зарядов из-за теплового движения. Диод закрыт. Диод способен выдержать ограниченную силу тока. Когда ток через прибор превышает этот предел, диод перегревается. В результате разрушается кристаллическая структура полупроводника, и прибор становится непригодным.

**Обратное включение** — подключение n-полупроводника к плюсу батарейки, а p-полупроводника к минусу. В этом случае внешнее электрическое поле  $E$  сонаправлено с запирающим полем. Движение зарядов снова будет зависеть от суммы полей  $E_0$  и  $E$ . Основные носители зарядов в полупроводниках под действием поля  $E + E_0$  будут двигаться от границы раздела, расширяя запирающий слой. Неосновные носители заряда будут двигаться к границе, и создавать ток, называемый током утечки. Он очень мал, по сравнению с током при прямом включении, так



как количество неосновных зарядов на много порядков меньше количества основных. При обратном подключении диод способен выдержать ограниченное напряжение, при превышении которого может произойти разрушение p-n перехода.



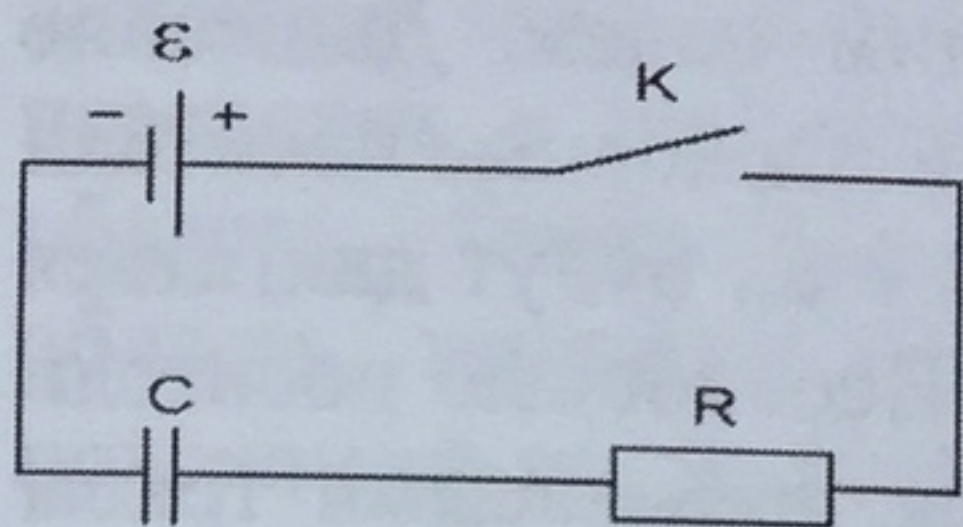
Конденсатор.



Основной характеристикой конденсатора является его ёмкость, характеризующая способность конденсатора накапливать электрический заряд. В обозначении конденсатора фигурирует значение номинальной ёмкости, в то время как реальная ёмкость может значительно меняться в зависимости от многих факторов. Реальная ёмкость конденсатора определяет его электрические свойства. Так, по определению ёмкости, заряд на обкладке пропорционален напряжению между обкладками  $q = CU$ .

Многие конденсаторы с оксидным диэлектриком (электролитические) функционируют только при корректной полярности напряжения из-за химических особенностей взаимодействия электролита с диэлектриком. При обратной полярности напряжения электролитические конденсаторы обычно выходят из строя из-за химического разрушения диэлектрика с последующим увеличением тока, вскипанием электролита внутри и, как следствие, с вероятностью взрыва корпуса.

В цепи постоянного тока конденсатор ведет себя как бесконечно большое сопротивление — ток через конденсатор отсутствует. Ток возникает только при замыкании или размыкании цепи. Если замкнуть цепь, то возникает ток, который приводит к зарядке конденсатора до напряжения источника тока. При размыкании цепи конденсатор разряжается.



Рассмотрим процесс зарядки конденсатора емкостью  $C$  через резистор с сопротивлением  $R$  от батарейки с ЭДС, равной  $\varepsilon$ . Запишем для цепи второе правило Кирхгофа:



$$I \cdot R + U_C = \varepsilon$$

Учтем связь тока, текущего через резистор, с изменением заряда на обкладках конденсатора:  $I = \frac{dq}{dt}$ . Получим уравнение:

$$\frac{dq}{dt} \cdot R + U_C - \varepsilon = 0$$

Заряд на обкладках конденсатора связан с напряжением на нем:

$$q = C \cdot U_C \Rightarrow \frac{dq}{dt} = C \cdot \frac{dU_C}{dt}$$

$$\frac{dU_C}{dt} \cdot CR + U_C - \varepsilon = 0$$

Сделаем замену переменных  $U = U_C - \varepsilon$ . Так как батарейка имеет постоянную ЭДС, то  $\frac{dU}{dt} = \frac{dU_C}{dt}$ . А значит, уравнение можно записать в виде:

$$\frac{dU}{dt} \cdot CR + U = 0$$

Решением полученного дифференциального уравнения с разделяющимися переменными будет:

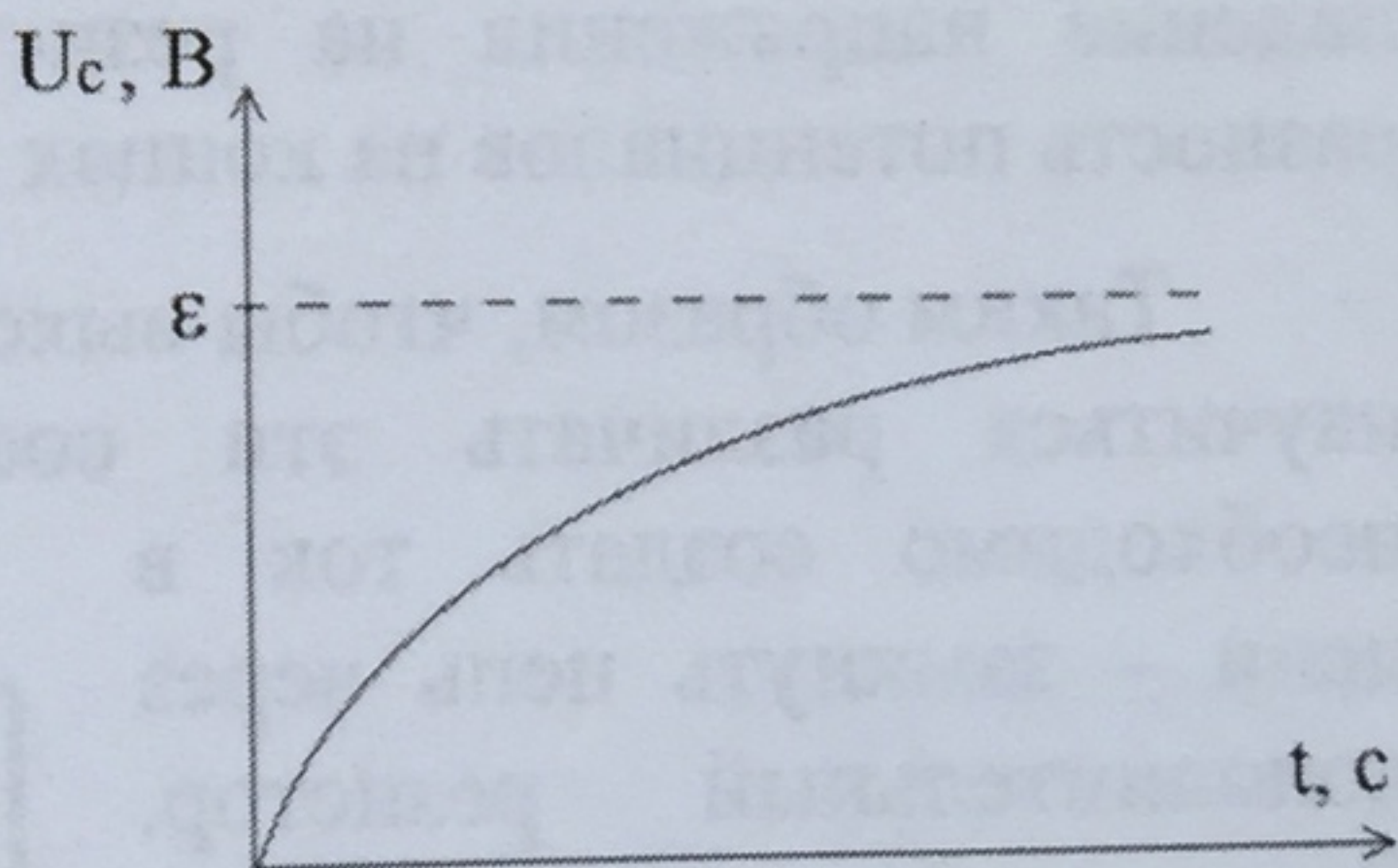
$$U = A \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

Зависимость напряжения от времени на конденсаторе выражается формулой:

$$U_C = \varepsilon + A \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

Параметр  $A$  можно найти из начальных условий. Пусть в начальный момент  $t = 0$  конденсатор был полностью разряжен,  $U_C(0) = 0$ . Подставив начальные условия в полученное выражение можно найти, что  $A = -\varepsilon$ . Таким образом, для напряжения на конденсаторе  $U_C$  получаем следующую зависимость от времени:

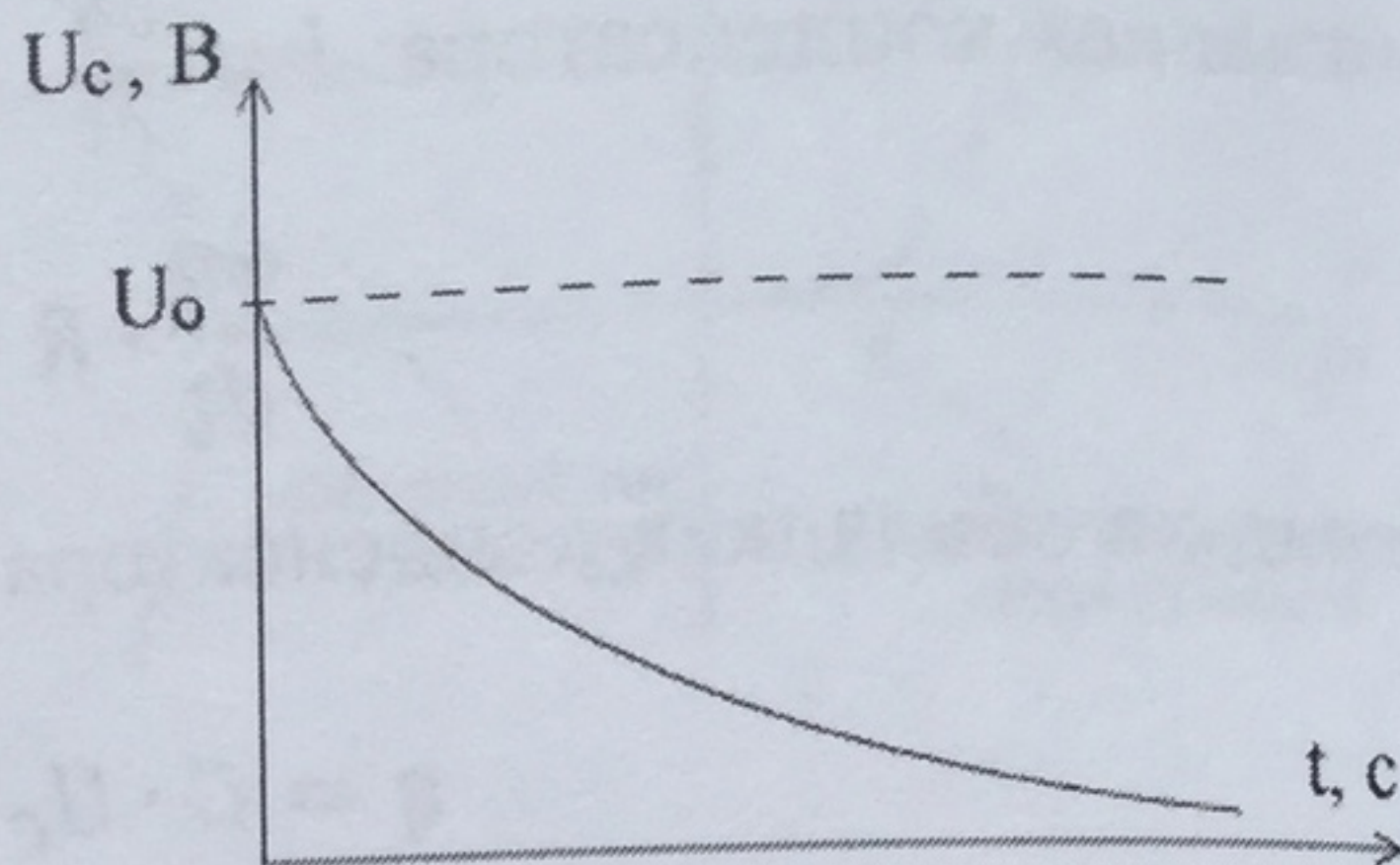
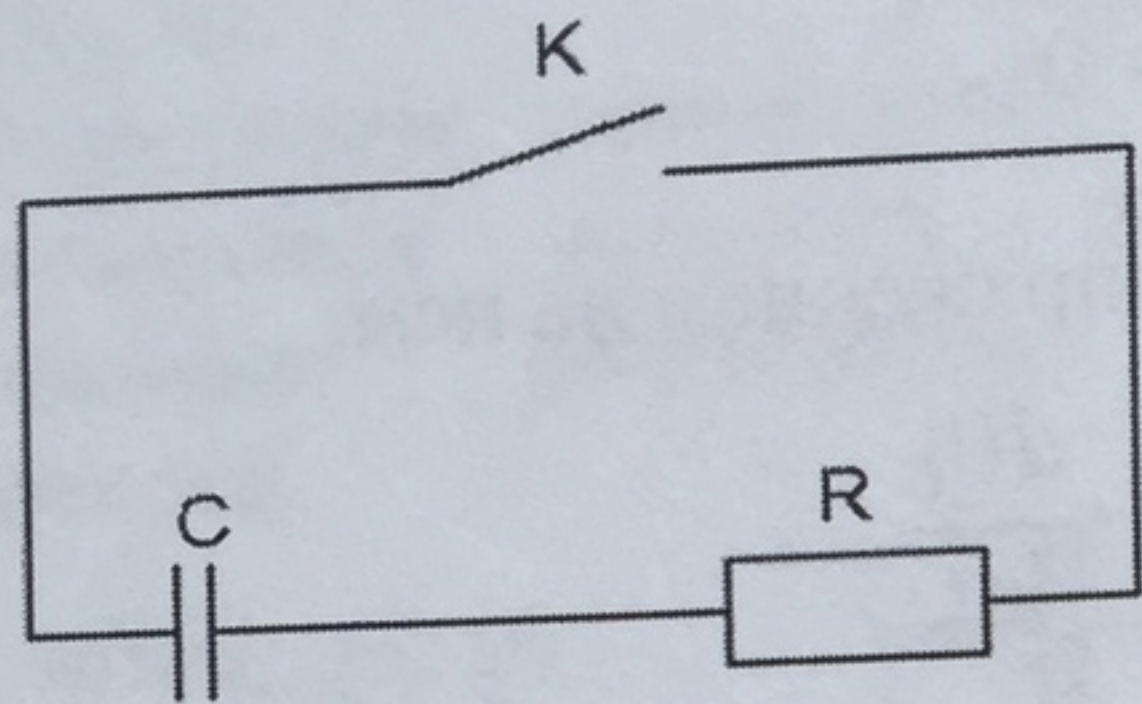
$$U_C = \varepsilon \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right)$$





Аналогично можно получить зависимость напряжения от времени для разряда конденсатора:

$$U_C = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$



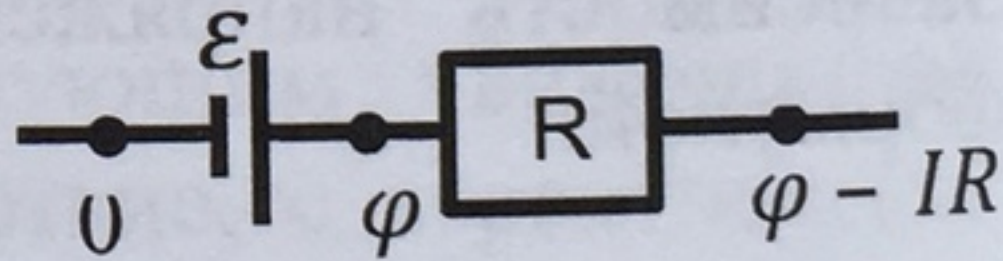
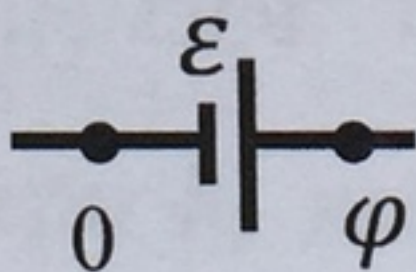
### §3. Исследование черного ящика

Все измерения проводятся в прямом и обратном направлении.

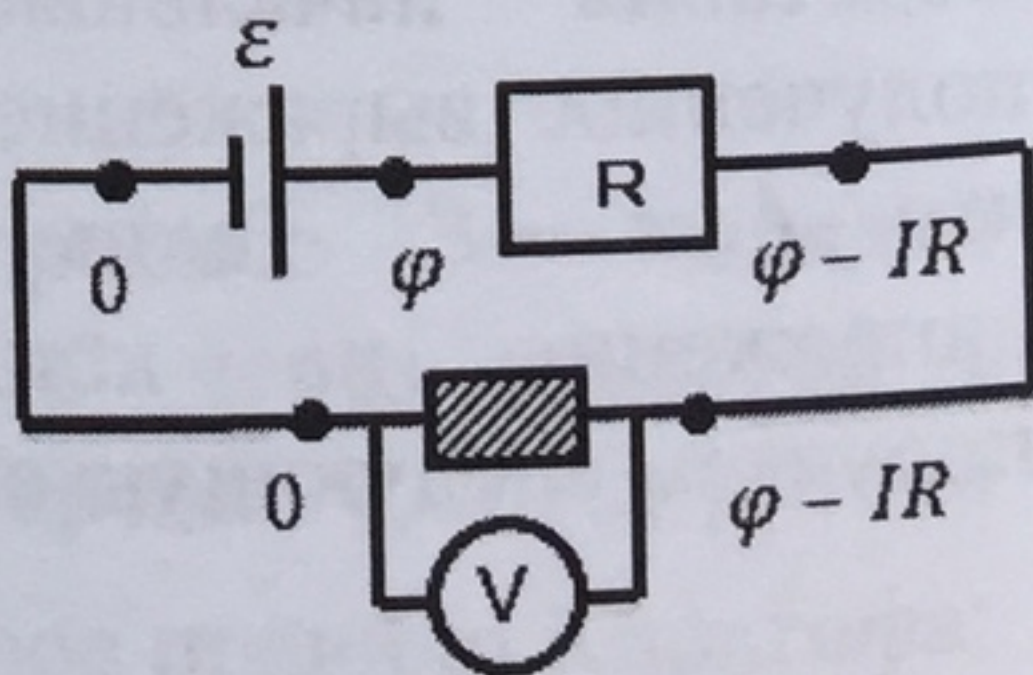
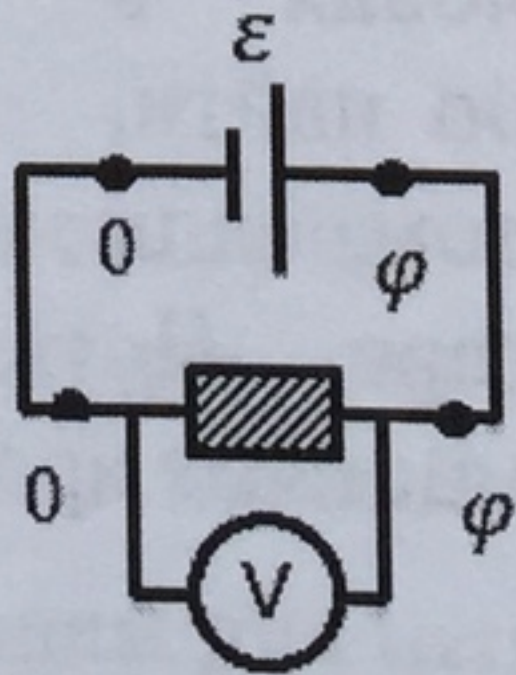
1. Поиск батарейки.
2. Проверка на наличие конденсаторов.
3. Определение сопротивлений.
4. Выявление нелинейных элементов: лампочка, диод и т.д.

#### Поиск батарейки

Как правило, при поиске батарейки на нескольких пар клемм черного ящика можно обнаружить вольтметром одинаковые значения напряжения. Это происходит, так как при отсутствии тока через резистор, последовательное соединение батарейка-резистор неотличимо от батарейки. Используем метод узловых потенциалов: так как по участку «батарейка + резистор» ток не течет, то падение напряжения на резисторе равно нулю ( $IR = 0$ ), а значит, разность потенциалов на концах схем одинакова.



Таким образом, чтобы выяснить местоположение батарейки, нужно научиться различать эти соединения. Для различия этих схем необходимо создать ток в цепи — замкнуть цепь через дополнительный резистор. Тогда напряжение на этом резисторе во второй схеме будет меньше, чем в предыдущих измерениях.



Определение  
Следует ска  
соединение «тре  
правило в черн  
запрещает соеди

$$R_1 = \frac{R_{12}R_{31}}{(R_{12}+R_{23}+R_{31})}$$

$$R_2 = \frac{R_{12}R_{23}}{(R_{12}+R_{23}+R_{31})}$$

$$R_3 = \frac{R_{23}R_{31}}{(R_{12}+R_{23}+R_{31})}$$

Обратим  
двумя клемм  
стоящего меж  
из параллель  
уравнений с

Для  
элементы  
необходим  
каждого и  
стандартну  
внимание,  
всегда сл  
так и при



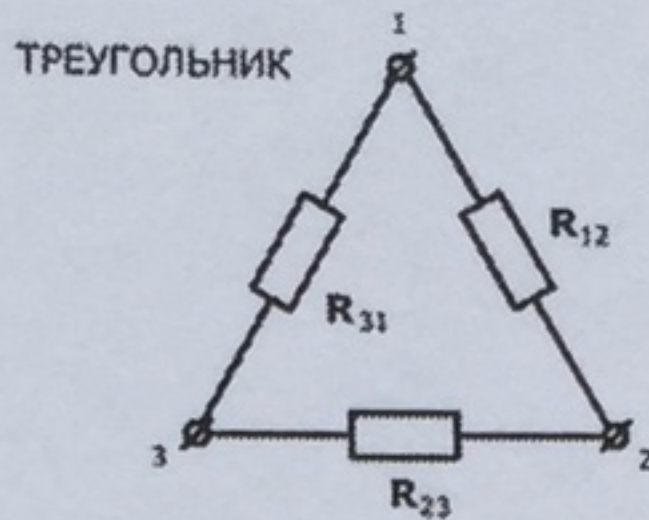
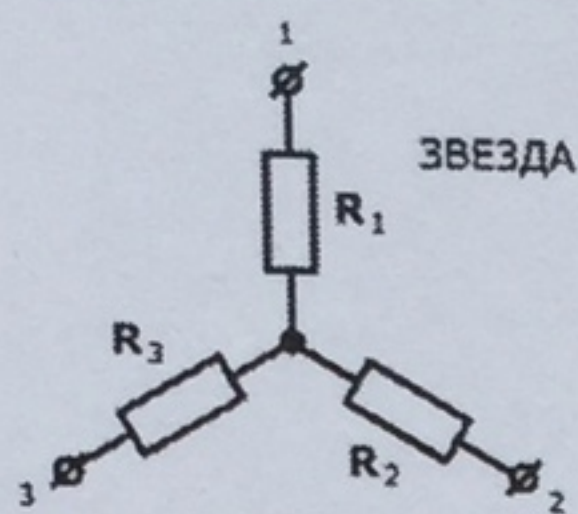
## Определение сопротивлений

Следует сказать, что с точки зрения измерительных приборов соединение «треугольник» неотличимо от соединения «звезда». Но как правило в черном ящике не существует дополнительных узлов, что запрещает соединение «звезда».

$$R_1 = \frac{R_{12}R_{31}}{(R_{12}+R_{23}+R_{31})}$$

$$R_2 = \frac{R_{12}R_{23}}{(R_{12}+R_{23}+R_{31})}$$

$$R_3 = \frac{R_{23}R_{31}}{(R_{12}+R_{23}+R_{31})}$$



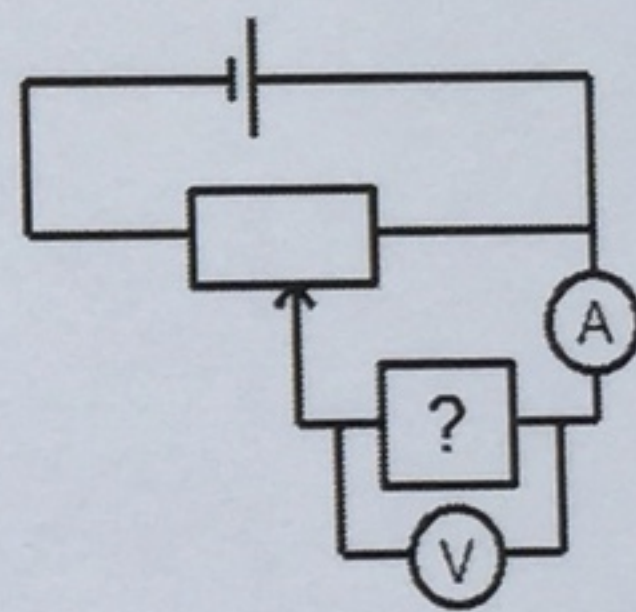
$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3}$$

$$R_{23} = R_3 + R_2 + \frac{R_3 R_2}{R_1}$$

$$R_{31} = R_1 + R_3 + \frac{R_1 R_3}{R_2}$$

Обратим внимание, что при измерении сопротивления между двумя клеммами, омметр показывает не сопротивление резистора, стоящего между ними, а эквивалентное сопротивление цепи, состоящей из параллельного соединения. В общем виде получаем систему из трех уравнений с тремя неизвестными.

Для подтверждения того, что найденные элементы действительно являются резисторами, необходимо построить вольт-амперные характеристики каждого из них. Для построения ВАХ применим стандартную схему, показанную на рисунке. Обратите внимание, так как в цепи может стоять диод, ВАХ всегда следует строить как при поданном положительном напряжении, так и при отрицательном.





Подписано в печать 07.10.2018

Объем 8.75 печ.л.

Тираж 500 экз.

Формат 60x90/16

Заказ № 6033

ИД ООО «Роликс».  
117218, г. Москва, ул. Кржижановского, 31.  
Тел.: 8 (495) 661-46-22  
[www.roliksprint.ru](http://www.roliksprint.ru)











**ВСЕГДА  
не верьте  
тому что  
кажется,  
верьте  
ТОЛЬКО  
доказательствам.**



**Чарльз Диккенс. «Большие надежды» 1861 г.**